

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ І.Р. Пархомей
(підпис)

“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Аналіз моделей кінематики та динаміки АРТЗ та методів їх управління

Виконав: студент другого курсу, групи ІК-81мп
(шифр групи)

_____ Дворський Володимир Олегович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н., доцент, Ткач М.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____ НК _____ к.т.н., доцент, Пасько В.П. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

І.Р. Пархомей

(підпис)

« » 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дворському Володимирі Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Аналіз моделей кінематики та динаміки АРТЗ та методів їх управління»,
науковий керівник дисертації Ткач Михайло Мартинович, доцент, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «28» Жовтня 2019 р. № 3770-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: Антропоморфний роботизований транспортний засіб
4. Предмет дослідження: Моделі кінематики, динаміки та методи управління АРТЗ
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз існуючих моделей АРТЗ, аналіз кінематики та динаміки АРТЗ, аналіз методів управління АРТЗ
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: шість плакатів
7. Орієнтовний перелік публікацій: дві публікації

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
НК	Пасько В.П., доцент		
Перевірка на співпадіння	Лісовиченко О.І., доцент		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз предметної області	12.09.2019 р.	
2	Постановка задачі	15.09.2019 р.	
3	Аналіз існуючих систем	22.09.2019 р.	
4	Аналіз кінематики та динаміки АРТЗ	08.10.2019 р.	
5	Аналіз методів управління АРТЗ	24.10.2019 р.	
6	Маркетинговий аналіз стартап-проекту	12.11.2019 р.	
7	Висновки	16.11.2019 р.	

Студент
(підпис)

(ініціали, прізвище)

Дворський В.О.

Науковий керівник дисертації
(підпис)

(ініціали, прізвище)

Ткач М.М.

АНОТАЦІЯ

У даній роботі розглянуто проблему аналізу моделей кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих транспортних засобів та методів їх управління.

В розділі аналізу моделей антропоморфних роботизованих транспортних засобів та методів їх управління було розглянуто сучасний стан антропоморфної робототехніки, проаналізовано наявні конструкції реальних антропоморфних роботів та базові підходи до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів, виконано постановку задачі.

Розділ розробки кінематичної структури антропоморфних роботизованих транспортних засобів присвячений опису кінематична структури загального вигляду, оцінено вплив навколишнього середовища на характеристики роботизованого засобу та його архітектуру. Розроблено і досліджено варіанти архітектури АРТЗ з урахуванням його взаємодії з навколишнім середовищем.

У розділі розробки функціоналу та архітектури АРТЗ описано функціональність, розроблено архітектуру взаємодії підсистем АРТЗ з навколишнім середовищем і засобами комп'ютерного дистанційного управління та модель взаємодії виконавчих органів з сенсорною системою АРТЗ через взаємовплив навколишнього середовища.

В розділі маркетингового аналізу стартап-проекту проаналізовано поточну ситуацію на ринку, розроблено стратегії та маркетингові плани для впровадження даного рішення.

Загальний об'єм роботи – 92 сторінки, 19 рисунків, 22 таблиці, 2 додатки, 50 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Ключові слова: антропоморфний роботизований транспортний засіб, антропоморфний крокуючий апарат, опорна поверхня, опорно-руховий апарат.

ABSTRACT

Diploma project examines the problem of analysis of models of kinematics and dynamics of anthropomorphic robotic vehicles and methods of their control.

In the section of analysis of models of anthropomorphic robotic vehicles and methods of their control, the current state of anthropomorphic robotics was considered, the existing designs of real anthropomorphic robots and basic approaches to modeling kinematic relationships and dynamics of anthropomorphic walking sets were analyzed.

The section on development of kinematic structure of anthropomorphic robotic vehicles is devoted to the description of kinematic structure of general appearance, the influence of the environment on the characteristics of the robotic vehicle and its architecture is evaluated. Variants of the ARV architecture have been developed and investigated, taking into account its interaction with the environment.

The functional and architecture section of the ARV describes the functionality, the architecture of the interaction of the ARV subsystems with the environment and computer remote controls and a model of interaction of executive bodies with the sensor system of the ARV through environmental interaction.

The Marketing Analysis section of the startup project analyzes the current market situation, develops strategies and marketing plans for implementing this solution.

Explanatory note size – 92 pages, 19 drawings, 22 tables, 2 appendices, 50 bibliographic titles by the list of references.

Keywords: anthropomorphic robotic vehicle, anthropomorphic walking apparatus, support surface, musculoskeletal system.

Пояснювальна записка
до магістерської дисертації

на тему: *Аналіз моделей кінематики та динаміки АРТЗ та
методів їх управління*

Київ – 2019 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1: АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ АНТРОПОМОРФНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ УПРАВЛІННЯ.....	11
1.1. Аналіз сучасного стану антропоморфної робототехніки	11
1.2. Аналіз наявних конструкцій реальних антропоморфних роботів	13
1.3. Аналіз базових підходів до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів	19
1.4. Постановка задач дослідження	30
Висновки до розділу	31
РОЗДІЛ 2: РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ АРТЗ	33
2.1. Кінематична структура загального вигляду АРТЗ	33
2.2. Оцінка впливу навколишнього середовища на характеристики роботизованого засобу та його архітектуру	48
2.3. Розробка і дослідження варіантів архітектури АРТЗ з урахуванням його взаємодії з навколишнім середовищем. Кінематична модель для пересування по довільній поверхні.....	50
РОЗДІЛ 3: РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛУ ТА АРХІТЕКТУРИ АРТЗ	54
3.1. Функціональність АРТЗ.....	54
3.2. Розробка архітектури взаємодії підсистем АРТЗ з навколишнім середовищем і засобами комп'ютерного дистанційного управління	59
3.2.1. Проблеми реалізації систем зв'язку з АРТЗ	59
3.2.2. Можливі варіанти реалізації зв'язку АРТЗ – комп'ютерний стенд.	62
3.3. Модель взаємодії виконавчих органів з сенсорною системою АРТЗ через взаємовплив навколишнього середовища.....	63
3.3.1. Загальна модель взаємодії АРТЗ з його сенсорикою через середовище	63
3.3.2. Модель взаємодії актуаторів і сенсорів АРТЗ через зовнішнє середовище	65

РОЗДІЛ 4: МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ СТАРТАП – ПРОЕКТУ	67
4.1. Опис ідеї проекту	69
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	71
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап–проекту.....	71
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	78
4.5. Розробка маркетингової програми стартап-проекту	82
ВИСНОВКИ	87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АРТЗ – антропоморфний транспортний засіб;

АКА – антропоморфний крокуючий апарат;

ТЦМ – точка центру мас;

ТПЦМ – точка проекції центру мас;

ОП – опорна поверхня;

ОРА – опорно-руховий апарат;

Т0М – точка нульового моменту;

ВСТУП

Техніко-соціальні тенденції в світі визначають перспективи застосування антропоморфних крокуючих апаратів (АКА) та систем на їх основі як транспортних засобів, що мають переваги, у порівнянні з колісними та гусеничними типами шасі, за прохідністю, енергоефективністю та універсальністю. АКА є складними об'єктами з неповним описом взаємодії із середовищем, важко піддаються автоматизації управління тому, що антропоморфний рух по опорній поверхні (ОП) є багатофакторним процесом з істотним рівнем невизначеності. Для забезпечення такого руху система управління АКА має задавати фазу руху апарата, обирати швидкість та напрям, а також забезпечувати усталеність руху на різних типах ОП. Сучасні методи управління рухом АКА передбачають його застосування в умовах заздалегідь відомої ОП, незмінної кінематичної схеми та заданих значеннях сил, які діють на апарат ззовні. Тому актуальним завданням є розроблення кінематичної та динамічної моделі АКА, функціональності та архітектури АРТЗ, що транспортують вантаж в умовах невизначеної опорної поверхні.

РОЗДІЛ 1: АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ АНТРОПОМОРФНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ УПРАВЛІННЯ

1.1. Аналіз сучасного стану антропоморфної робототехніки

У соціальній сфері господарства перспективною для застосування є така галузь РТС, як мобільна робототехніка. Але, не дивлячись на це, вона має низьку інтенсивність впровадження. На даний момент більшість мобільних роботів побудовано за принципом колісного або гусеничного переміщення, тоді коли антропоморфні (людиноподібні) системи поступаються їм у розвитку. Серед колісних або гусеничних систем найбільш вдалим є такі РТЗ, як: Rollin' Justin, створений К. Бурстом і К. Уоттом, KATE rev.1, розроблена лабораторією FutureBots Labs', Meet Pepper, розробка фірм Aldebaran Robotics і Softbank. Найбільший експериментально-науковий внесок у розвиток робототехніки, зокрема систем, побудованих на принципі колісного або гусеничного руху, зробили такі автори: Річард Волпе, Аднан Ансаром та Мехді Беналеже. Зокрема, робота групи авторів М. Беналеже, А. Бертоза та Ж.П. Ламонда “Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization” є орієнтованою на побудову руху робота рикші. А.Бустос у своїй роботі визначив актуальність об'єднання засобів динаміки, навігації, антропоморфності, маніпуляції, ергономіки, енергоефективності тощо у єдину систему задля забезпечення їх високим рівнем взаємодії.

Від початку виходу у 1901 році статті Едварда Мейбріджа “Human Figure in Motion” тривали спроби побудови крокуючих апаратів. Найбільш успішними серед розроблених вважають наступні проекти: DLR BiPed, сконструйований К. Уоттом, Г. Гірзінгером та М.А. Роа; Atlas, розроблений Boston Dynamics; ASIMO, компанія Honda Motor Company; REEM-C, розробка компанії PAL robotics; HRP-4 (“Promet”), розроблений за спільних зусиль організацій NEDO, Kawada Industries, Inc і фінансово-економічної палати Японії METI. Surena, розроблений при університеті Iran's Tehran.

У побудові антропоморфного крокуючого апарату (АКА) досягнуто значного прогресу, але досі не існує завершеного виробу, який був би здатним вирішити усі проблеми сьогодення.

У результаті робіт Б.А. Бордюга, А.Г. Тімошенка, В.Б. Ларіна, В.В. Величенка, Д.Є. Охоцимського, В.В. Белецького, Н.А. Бернштейна, М. Вукобратовича, К. Уотта та М.А. Роа була розмежована загальна задача побудови роботизованих КА на ряд підзадач, вирішення яких згодом дає можливість успішно вирішити початкову задачу у побудові АКА з властивою людині динамікою.

У публікації К. Уотта уся увага привернута до побудови динамічної моделі АКА. Автор виділив три основні етапи, а саме:

1. Етап побудови статичної та динамічної моделі КА;
2. Етап побудови математичних правил дотримання сталого положення і алгоритмів руху КА;
3. Етап енергетичного аналізу та реалізації штучної ходи.

В інших публікаціях були розмежовані етапи моделювання КА з управлінням його усталеним рухом:

1. Етап моделювання середовища та апарата. На цьому етапі здійснюється опис АКА, ОП і зовнішнього середовища та задаються характеристики зовнішніх впливів на апарат. Модель антропоморфного крокуючого апарата характеризується методом і типом його подання;

2. Етап управління дотриманням на опорній поверхні усталеного положення КА;

3. Етап управління усталеним рухом КА на опорній поверхні. На цьому етапі будуються та описуються методи управління усталеним рухом антропоморфного крокуючого апарата, які базуються на принципах дотримання стійкості та обраній стратегії управління КА. Також формалізується метод управління рухом крокуючого апарата, що залежить від моделі динаміки КА, моделі середовища, можливостей виконавчої

системи та структури сенсорної системи апарату, що у сукупності з траєкторією переміщення центру мас антропоморфного крокуючого апарата формують закон руху. Задля реалізації цього етапу, необхідно вирішити наступні задачі: виконати моніторинг та аналіз інформації щодо взаємодії АКА із навколишнім середовищем, здійснити моніторинг поточного стану та положення апарату у просторі, зчитати траєкторію руху ТЦМ АКА, вирішити задачі побудови руху як циклу кроків апарату та задачі класифікування циклічної зміни фаз рухів АКА, сформулювати задачі управління сталим рухом апарата та зміною фаз руху КА, розв'язати обернену задачу кінематики управління ланками апарату у межі задачі зміни фаз його руху.

У разі вирішення вищезгаданих задач, з'являється змога вирішити первинну задачу управління рухом антропоморфного крокуючого апарата.

1.2. Аналіз наявних конструкцій реальних антропоморфних роботів

Серед існуючих розробок крокуючих систем варто відзначити такі проекти, як *DLR BiPed* (рис.1.1), сконструйований К. Уоттом, М.А. Роа та Г. Гірзінгером; *Atlas* (рис.1.1), що є розробкою компанії *Boston Dynamics*; *ASIMO* (*Advanced Step in Innovative Mobility*) (рис.1.2) – проект компанії *Honda Motor Company*; *REEM-C* (рис.1.3), компанія *PAL robotics*; *HRP-4* (*"Promet"*) (рис.1.3), розроблений за спільних зусиль організацій *NEDO*, *Kawada Industries, Inc* і фінансово-економічної палати Японії *METI*; *Surena* (рис.1.4), розроблений при Університеті *Iran's Tehran*.

У побудові (АКА) досягнуто значного прогресу, але все ще не існує завершеного виробу, здатного вирішити усі проблеми сьогодення.

У результаті праць таких авторів, як: Б.А.Бордюга, А.Г.Тімошенко, М.Вукобратович, В.В.Величенко, Д.Є.Охоцимський, В.В.Белецький, Н.А.Бернштейн, В.Б.Ларін, К.Уотт та М.А.Роа, було розмежовано загальну задачу побудови роботизованих КА на ряд підзадач, вирішення яких надасть

можливість успішно розв'язати початкову задачу у побудові АКА з динамікою, властивої людині.

На рис.1.1 –1.4 показані конструкції сучасних роботів:

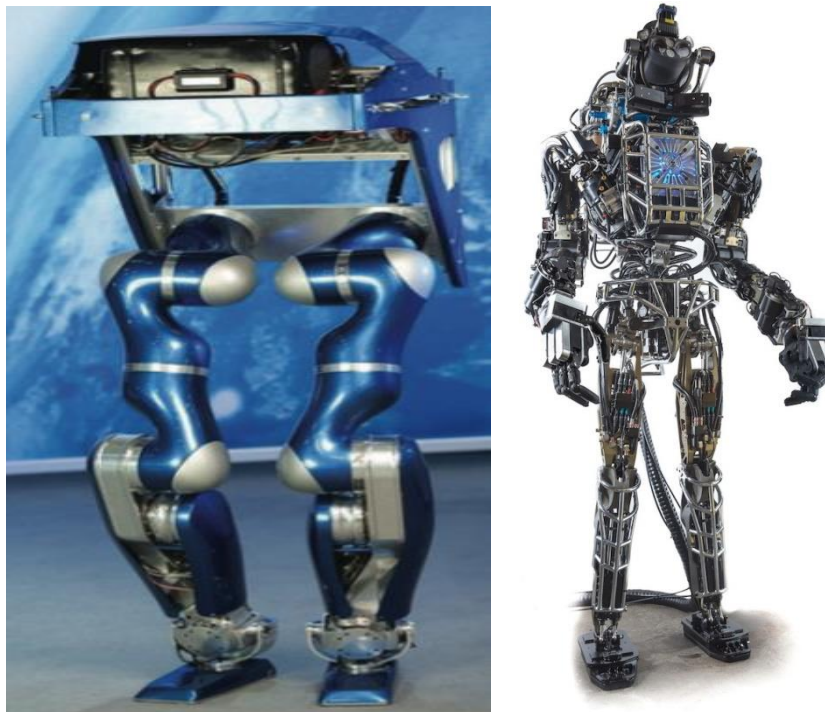


Рис.1.1. Найуспішніші крокуючі PTC: DLR BiPed; Atlas



Рис.1.2. Крокуючий PTC ASIMO



Рис.1.3. Крокуючі PTC: REEM-C; HRP-4



Рис.1.4. Крокуючий PTC Surena

К. Уотт у своїй публікації приділив увагу до побудови динамічної моделі АКА. Він виділив такі три основні етапи, як: побудова статичної та динамічної моделі КА, побудова математичних принципів дотримання сталого положення та алгоритмів руху крокуючого апарата та етап енергетичного аналізу та реалізації штучної ходи.

В інших публікаціях автори розмежували етапи моделювання самого КА з управлінням його усталеним рухом:

1. Етап моделювання апарата і середовища;
2. Етап управління дотриманням сталого положення АКА на ОП;
3. Етап управління сталим рухом крокуючого апарата на опорній поверхні.

Етап моделювання середовища та апарата передбачає виконання опису АКА, середовища та опорної поверхні, визначення характеристик інших зовнішніх впливів на апарат. Тип і метод подання АКА характеризують його модель.

Розрізняють аналітичні та комп'ютерні типи моделей кінематики та динаміки АКА. Аналітичну кінематичну модель прийнято подавати в матричній формі, вона описує лінійне та кутове переміщення ланок апарата, але не враховує причини переміщення. Аналітична динамічна модель описує дію внутрішніх і зовнішніх сил на ланки крокуючого апарата, враховує маси ланок, довжини та час впливу цих величин. Для подання даної моделі апарата використовують методи Ньютона-Гауса, Ейлера, Лагранжа, тощо. У застосуванні аналітичних методів подання моделей кінематики та динаміки існує низка обмежень. Характеризуються вони складністю, розмірністю та розмірами математичного подання кінематики і динаміки. Методи комп'ютерного моделювання застосовують для побудови моделей АКА з високою деталізацією опису. Отже, вищенаведені обмеження вирішуються автоматизовано.

На етапі “управління сталим рухом крокуючого апарата на ОП” будуються та описуються методи управління сталим рухом КА, які ґрунтуються на критеріях дотримання стійкості апарата та обраній стратегії його управління. Virізняють антропоморфні та аналітичні методи управління сталим рухом АКА. Антропоморфні методи передбачають застосування антропоморфних моделей крокуючого апарата, а також структури сенсорної системи, тоді, коли в аналітичних методах використовують і такі моделі КА, які можуть бути не схожими на антропоморфні. Найбільш розповсюджені критерії управління сталим рухом АКА це критерії відстеження та аналізу положення ТЦМ та положення ТПЦМ, критерії аналізу кутових положень, моментів у сполученнях АКА та аналізу зусиль у кінематичних парах, критерії відстеження та аналізу швидкостей, кутових прискорень та переміщень точки корпусу апарата відносно точки на його стопі та відносно віддаленого стаціонарного об'єкта.

Стратегія управління процесом дотримання сталого положення крокуючого апарата ґрунтується на принципах швидкого досягнення сталого положення апарата на ОП; найвищої енергоефективності при збереженні сталого руху; збереження сталого руху апарата з урахуванням мінімальної витратності для послідууючого керованого завалу, який виконується за законом руху АКА; досягнення сталого стану крокуючого апарата на опорній поверхні та підтримка максимального запасу стійкості апарата при його русі по опорній поверхні.

Залежно від будови та умов експлуатації АКА, його структури сенсорної системи та вирішуваних задач можуть комбінуватися критерії дотримання стійкості та стратегії управління крокуючого апарата з метою їх взаємного доповнення.

Також, на етапі “управління сталим рухом АКА по ОП” постає необхідність формалізації метода управління рухом апарата, Він залежить від багатьох факторів, від динамічної моделі КА, від моделі середовища, від

структури його сенсорної системи та від можливостей виконавчої системи, що у поєднанні із траєкторією переміщення ТЦМ апарата формують закон руху. Для того, щоб реалізувати цей етап, сперш необхідно вирішити такі задачі:

- Виконати моніторинг та аналіз інформації щодо взаємодії АКА із навколишнім середовищем;
- Виконати спостереження за поточним станом та просторовим положенням апарата;
- Зчитати траєкторію руху ТЦМ АКА;
- Вирішити задачі побудови руху апарата, як циклу кроків;
- Вирішити задачі систематизації циклічної зміни фаз руху АКА;
- Визначити задачі управління сталим рухом та зміною фаз руху крокуючого апарата;
- Вирішити обернену кінематичну задачу управління ланками АКА в межах задачі зміни фази руху апарата.

Вирішення вищенаведених задач, дає можливість вирішити первинну задачу управління рухом крокуючого апарата. Але управління АКА в нестандартних умовах вимагає вирішення низки додаткових задач, деякі з них можуть вимагати побудови моделі АКА, здатної враховувати додаткові керуючі впливи на апарат. Це може бути пов'язано з урахуванням динаміки руху ланок апарату, що не мають причетності до опорно-рухового апарату або із застосуванням іншої кінематичної схеми крокуючого апарата, інших критеріїв, методів і засобів управління сталим рухом апарата, із забезпеченням сталого руху АКА на довільній опорній поверхні або із виконуваними апаратом операціями, що передбачають взаємодію з іншими об'єктами або зі стохастичною зміною динамічної поведінки АКА, що застосовується в ситуаціях, спричинених можливою зміною умов сталого руху або зміною напрямку руху та впливом зовнішніх сил на апарат.

Отже, для того, щоб побудувати АКА, який буде здатний рухатись по довільній опорній площині, необхідно виконати дані етапи з урахуванням усіх додаткових задач.

1.3. Аналіз базових підходів до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів

Найбільший внесок у моделювання антропоморфних крокуючих апаратів здійснили наступні вчені: М. Вукобратович, Н.А. Бернштейн, В.В. Веліченко, Е. Мейбрідж, К. Чов, Ю. Фуджімото, Е. Чеморі, Е. Френк, Р. Томовіч, Д. Якобсон, А. Шеморі, Т. Мак-Гір, С. Крут, К. Нішівакі та інші.

Перші наукові спостереження за рухом і переміщенням тварин та людини здійснили у своїх роботах В.В. Белецький та Е. Мейбрідж. Були зроблені кінограми та ескізи ритміки та моторики руху, а також визначені фази людської ходи (рис.1.5) із наданою їм класифікацією. Метод кінограми руху був застосований вперше. Отримані дані на кінограмі (рис. 1.5), дали змогу визначити пропорції та положення ланок, діапазони кутів у зчленуваннях, ритміку руху та кінематику АКА (рис.1.6).

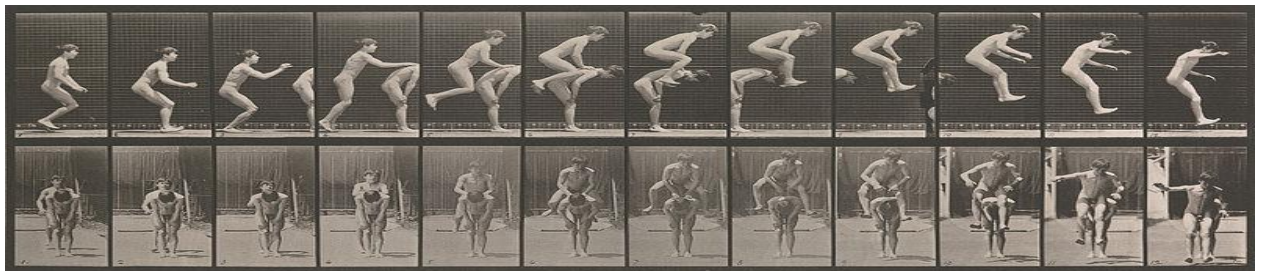


Рис.1.5. Циклічність фаз переміщення стрибком

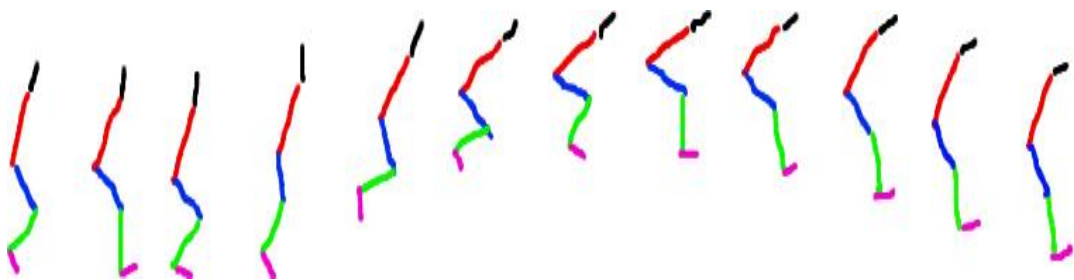


Рис.1.6. Двовірна кінематична модель АКА, отримана за допомогою кінограми Е. Мейбріджа

Так як зазначені характеристики визначають положення ТЦМ, то їх можна застосовувати при вирішенні задач моніторингу стану рівноваги людини або АКА у різних положеннях.

Опираючись на роботи Е. Мейбріджа, радянський лікар і науковець М. А. Бернштейн визначив фазовість та циклічність руху людини, з'ясував, що в залежності від місцезнаходження ТЦМ людини, положення ланок її опорно-рухового апарата містить алгоритмічний характер. Він був першим, хто припустив, що у дотриманні статичної рівноваги людиною, беруть участь вестибулярний апарат і тактильна чутливість кінцівок.

Т. Мак-Гір у своїх роботах здійснив побудову моделі двовимірного КА із застосуванням математичних засобів його синтезу. Для того, щоб описати кінематичну схему та динаміку руху КА, він використав методи теоретичної механіки та елементи теорії стійкості. Для формування рівняння руху крокуючого апарату автор застосував теорію про кінцеві стани. Кінематична структура моделі КА (рис.1.7) налічує три ланки (дві одноланкові ноги та корпус).

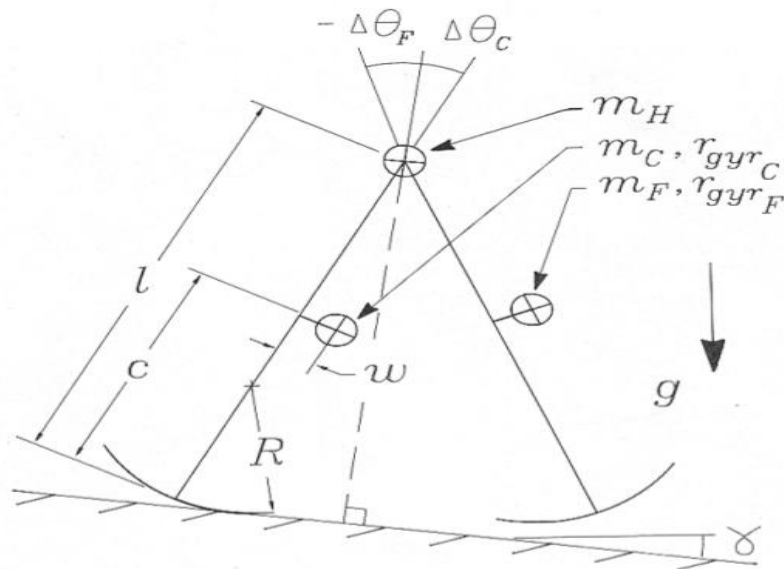


Рис.1.7. Кінематична схема КА з радіальними опорами, задана в сагітальній площині

У даній моделі одноосеве зчленування забезпечує взаємний рух ланок, а параметри $-\Delta\theta_f$ і $-\Delta\theta_c$ визначають їх кутове положення (діапазон відхилення ніг апарата). За допомогою параметрів m_h, m_c, m_f задаються маси апарата та його ланок. Параметри r_{gyr_c}, r_{gyr_f} визначають сили, що виникають внаслідок взаємодії апарата з опорною поверхнею. Параметри l, c визначають довжини ланок. Параметр ω є відхиленням проекції ТПЦМ, γ – кут нахилу ОП, φ – максимальний кут нахилу ОП, g – спрямування вектора сили тяжіння. Особливістю даної моделі КА є будова стопи апарата. Сектор кола з радіусом R формує область дотичних точок ніг крокуючого апарата до опорної поверхні. Таке подання дозволяє опис кутового положення КА методом напрямних косинусів.

Т. Мак-Гір у своїй роботі продемонстрував динаміку моделі апарата. Рух крокуючого апарата являє собою почергове перенесення ніг крокуючого апарата у нове положення, подібно до оберненого маятника. Врахування моментів зіткнення ніг з опорною поверхнею описується так:

$$H^b = (\cos 2\alpha_0 + r_{gyr}^2) ml^2 \Omega$$

$$H^a = (1 + r_{gyr}^2) ml^2 \Omega ,$$

де: H_b, H_a – моменти до та після зіткнення відповідно; α_0 – кут який у разі зупинки апарата описується як $\theta = -\alpha_0$ і змінюється в діапазоні $[-\Delta\theta() \dots \Delta\theta(c)]$.

При переносі ноги ТПЦМ крокуючого апарата переміщується від дотичних точок задньої ноги до дотичних точок передньої ноги, таким чином апарат почне завалюватися, якщо ТПЦМ вийде за межі його стопи. На рис.1.8 зображена фізична реалізація крокуючого апарата.

У своїх роботах К. Чов і Д. Якобсон продемонстрували як при завданні положення ланок апарата застосовуються методи оптимального програмування. Математична модель, яку вони обрали для застосування даних методів, ґрунтується на триланковій системі твердих тіл, в якій кожна з

ланок характеризувалася довжиною та масою. Дана модель має одну особливість – у ній відсутні ланки стоп. Це дозволило використати методи дотримання рівноваги, які ґрунтуються на теоремі Ляпунова для систем маятникового типу.

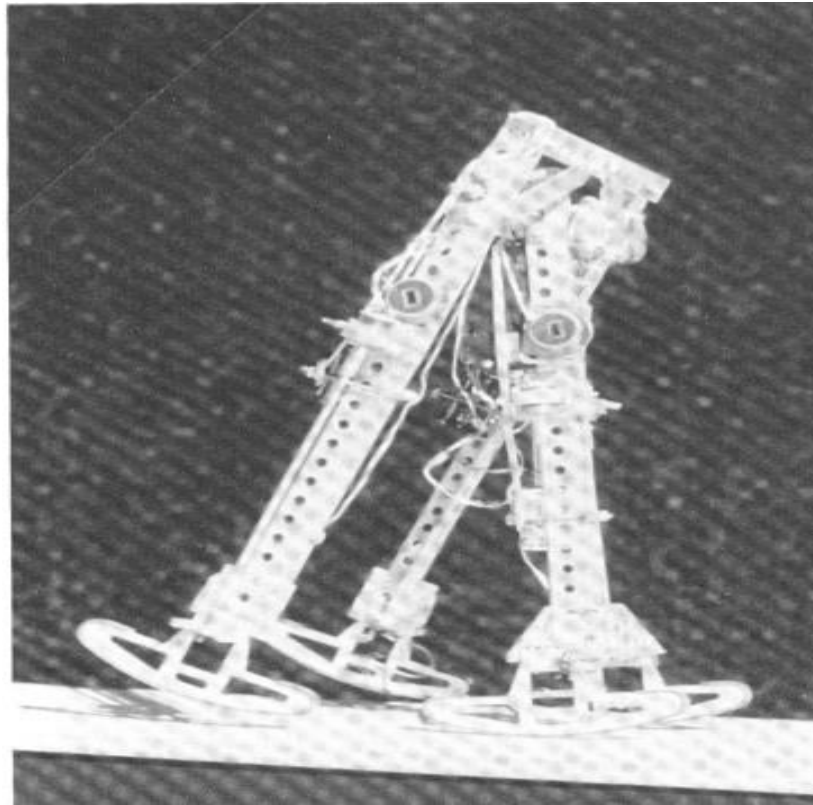


Рис.1.8. Крокуючий апарат з перекочувальним принципом руху

У своїй публікації М. Вукобратович, для побудови статичної моделі антропоморфного крокуючого апарата, вибрав двовимірну та тривимірну системи координат. Їх він використовував для дослідження кінематики та динаміки руху апарата, відповідно. М. Вукобратович побудував модель з п'яти твердих тіл, які через обертальні сполучення пов'язані між собою у кінематичні пари. Дана модель має у своєму складі суцільний одноланковий корпус, ланки бедер та ланки гомілок. В моделі за допомогою одноосьових, двоосьових та триосьових зчленувань всі ланки зв'язані в один розімкнений кінематичний ланцюг. Модель Вукобратовича формалізує кінематичну взаємодію між ланками КА і використовується для його побудови. Також

модель дає можливість задати параметри мас, довжин, моментів інерції та положення ТЦМ ланок. При побудові моделі, використовувався математичний апарат, який ґрунтувався на рівняннях Лагранжа. Для визначення положення ланок та перехідних значень кутів застосовувався метод кутів Ейлера, а для визначення моментів інерції у зчленуваннях АКА використовувалося рівняння про моменти стержнів, зокрема, у випадку із стержнями з малим радіусом перерізу.

У публікації М. Беналеге, Дж.-П. Ламонда та Е. Бертоза “*Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization*” автори показали розроблену двовимірну модель АКА для задач пасивної ходи. Дана модель являє собою дволанковий корпус та дві одноланкові ноги. В моделі кожна з ланок характеризується масою m та довжиною l , відповідно.

Динаміка моделі описана вектором x вигляду $x=[\Theta, \varphi, \alpha, \beta, \dot{\Theta}, \dot{\varphi}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}]^t$, де параметр t визначається залежно від моменту зіткнення ланки АКА з ОП. Через не пружний характер зіткнення, управління моделлю може здійснюватися за допомогою методу кінцевих станів. Динаміка моделі розглядається в проміжку між зіткненнями ніг крокуючого апарату з опорною поверхнею. Дана модель формалізована у вигляді рівняння $\tau_k=[\tau_{t,k} \ \tau_k]^t$

Наступним чином описується зміна параметрів вектора стану:

$$X_{k+1}=f(x_k, \tau_k),$$

де f — функція, яка у проміжку часу між τ_{k-1} і τ_k набуває приросту параметрів вектора x .

Автори роботи при моделюванні динамічних процесів управління рівновагою антропоморфного крокуючого апарату використали принцип теореми Ляпунова, але він обмежує структуру кінематичної схеми АКА.

Е. Чеморі, С. Крут, Е. Домбре та С.Ле-Флок у публікації “*A Control Architecture With Stabilizer For 3D Stable Dynamic Walking of SHERPA Biped Robot on Compliant Ground*” демонструють будову та застосування

кінематичної моделі АКА із 12-ма ланками. Усі ланки даної моделі переміщуються із урахуванням наявної ОП та наділені вони 18-ма ступенями свободи. Значення кутів для управління моделлю задані у вигляді вектора управління $X \in R^{18}$. Сама дана кінематична модель описується вектором $X_{tags} = f(q)$; $q \in R^{18}$; $X_{tags} \in R^{18}$, а зворотня її модель (простір станів) описується так: $q = f^1(X_{tags})$; $q \in R^{18}$; $X_{tags} \in R^{45}$. На рис.1.9 зображено графічну інтерпретацію кінематичних зв'язків даної моделі крокуючого апарата.

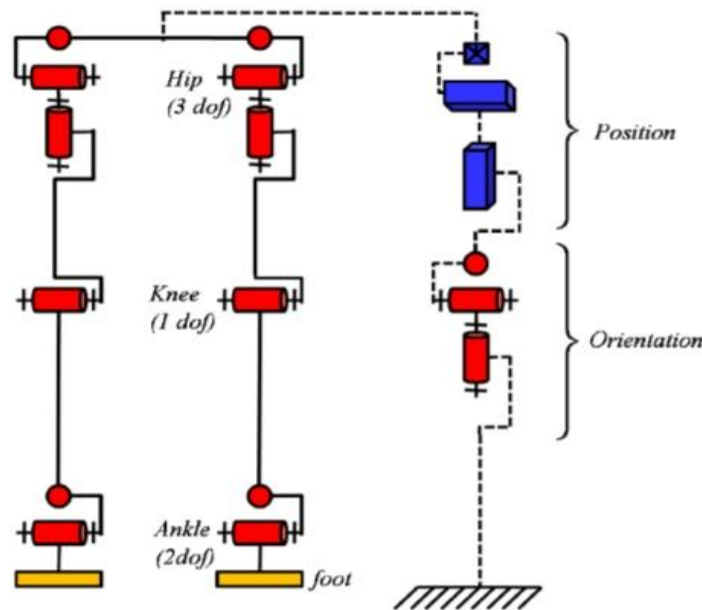


Рис.1.9. Кінематична схема тривимірного АКА з 18 ступенями свободи: *Hip*, *Knee*, *Ankle* – шарніри апарата; *dof* – кількість ступенів свободи у шарнірі; *Position* – блок схеми, що відповідає за переміщення апарата; *Orientation* – блок схеми, що відповідає за розворот апарата

Отже, з рис.1.9. бачимо, що тазобедерний шарнір налічує три ступені свободи кутового переміщення, гомілкобедровий – один ступінь, а гомілкоstopовий шарнір має два ступені свободи.

Дана кінематична модель АКА має особливість, пов'язану із наявністю у ній групи зчленувань *Position* та *Orientation* (рис.1.9). Саме вони задають кутове та лінійне положення апарату відносно ОП. На основі даної кінематичної моделі було побудовано динамічну модель АКА, яка так само

має 18 ступенів свободи. Динаміка моделі задається рівняннями Лагранжа і має вигляд:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su,$$

де: $q = [q_1, \dots, q_{12}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, T_x, T_y, T_z]^T \in R^{18}$ – вектор узагальнених координат; $M(q) \in R^{18 \times 18}$ – матриця інерції ланок; $C(q, \dot{q}) \in R^{18 \times 18}$ – матриця доцентрових та Коріолісових прискорень; $G(q) \in R^{18}$ – вектор сили тяжіння; $u \in R^{12}$ – вектор вхідних управляючих впливів; $S \in R^{18 \times 12}$ – матриця розподілу обертових моментів зчленувань. Рівняння динаміки моделі крокуючого апарата при дотику його ланки або ланок до опорної поверхні задається рівнянням:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Su + J(q)^T \lambda,$$

де λ – Лагранжеві множники, $J(q)$ – матриця Якобі.

Також автори праці у дану кінематичну модель втілили додаткову модель, яка описує взаємодію стопи АКА з опорною поверхнею.

Т. Гуї, Н. Чуонг та Н. Пхонг у своїй роботі “*Control of Biped Robot with Stable Walking*” продемонстрували кінематичну модель АКА, що налічує 10 ступенів свободи. На рис.1.10 зображена схема моделі, що має 8 ланок. Ланки *TorsoC* та *BK* задають тулуб і таз апарата, відповідно, ланки *KK₁*, *BB₁* задають бедра, а ланки *K₁E*, *B₁B₂* визначають гомілки АКА. Усі ланки моделі характеризується масою та довжиною, параметри m та l відповідно. Кінематичну взаємодію ланок задають за допомогою координат точок, які у свою чергу формують відповідні ланки (рис.1.10). Відповідно до прийнятого подання координат точок, задана модель у тривимірному просторі. Особливістю даної моделі крокуючого апарата є присутній антропоморфний набір ланок і ступенів свободи. Також модель має в собі ланки тазу і стоп, що є хорошою опцією для дослідження динаміки процесів руху апарата.

Положення моделі визначається значеннями кутів $[\theta_1, \dots, \theta_{10}]$, де: $\theta_1, \theta_2, \theta_9, \theta_{10}$ – кути між гомілкою та стопою у площинах X та Z лівої та правої ноги, відповідно; θ_3, θ_8 – кути між стегном і гомілкою лівої та правої ноги;

$\theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$ – кути повороту ланок бедер у площинах Y та X лівої та правої ноги.

Задається статичне положення даної моделі координатами точки центру тазу. Формалізується воно так:

$$x_{ca} = l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_3 - \theta_1);$$

$$y_{ca} = l_1 \sin(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_3 - \theta_1) \sin(\theta_2) + \frac{l_3}{2} \cos(\theta_3 + \theta_4);$$

$$z_{ca} = l_1 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_3 - \theta_1) \cos(\theta_2) - \frac{l_3}{2} \sin(\theta_2 + \theta_4).$$

Положення ТЦМ моделі АКА задається так:

$$x_{com} = \frac{m_b x_b + m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_c x_c + m_3 x_3 + m_4 x_4 + m_e x_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e};$$

$$y_{com} = \frac{m_b y_b + m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_c y_c + m_3 y_3 + m_4 y_4 + m_e y_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e};$$

$$z_{com} = \frac{m_b z_b + m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_c z_c + m_3 z_3 + m_4 z_4 + m_e z_e}{m_b + m_1 + m_2 + m_c + m_3 + m_4 + m_e},$$

де m – маси, сконцентровані у сполученнях кінематичних пар.

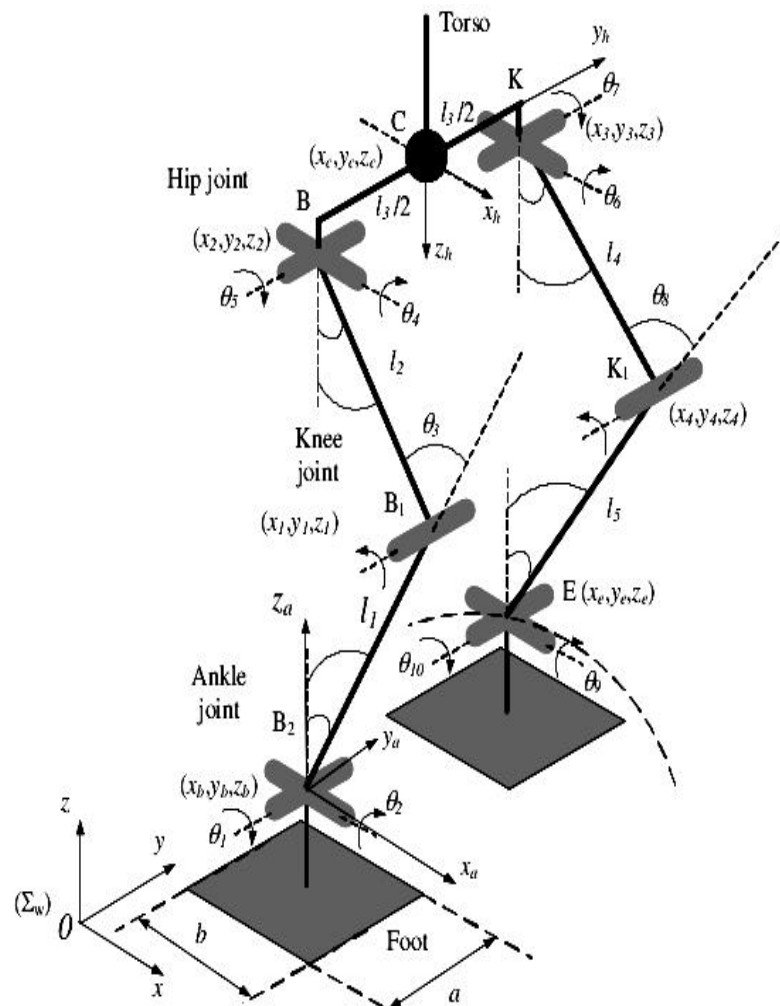


Рис.1.10. Кінематична модель АКА з 10 ступенями свободи

Де x, y, z – базова система координат апарата; a, b – ширина та довжина стопи, відповідно; B, B_1, K, K_1, E – сполучення АКА; θ – кути кінематичних пар ланок; C – положення ТЦМ; *Hip, Knee та Ankle joint* – блоки сполучень апарата; *Torso* – ланка корпусу, що також включає в себе голову, руки, шию тощо.

На основі даної кінематичної моделі було побудовано динамічну модель апарата. У АКА кінематичні та динамічні моделі побудовані для одно- та двоопорної фаз руху, так як при зміні опорної фази, також змінюються кінематична та динамічна моделі АКА.

Кінематична модель в одноопорній фазі руху визначається координатами ТЦМ АКА $C[x_{ca}, y_{ca}, z_{ca}]$. Вектором $q = [\theta_r, \theta_p, r]^T$ вона пов'язана з точкою на опорі. На рис.1.10 та рис.1.11 зображені параметри векторів C та q

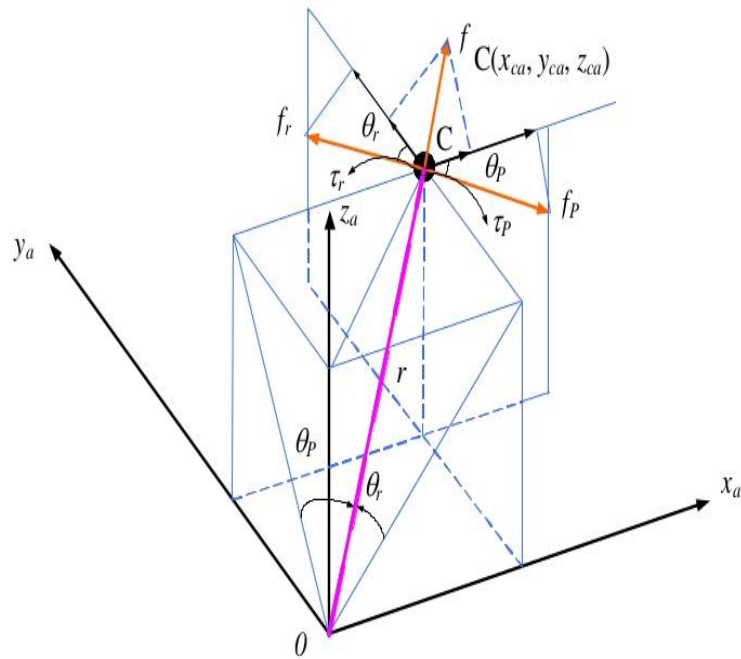


Рис.1.11. Тривимірний модель взаємодії ноги АКА з ОП

Де x_a, y_a, z_a – орти системи координат даної моделі; θ_r, θ_p – кути (моменти) ланки ОС; r – відстань до ТЦМ від базової точки; C – точка центру мас; f_r, f_p, f – сили, що у проекціях на орти системи координат діють на ТЦМ; x_{ca}, y_{ca}, z_{ca} – система координат точки центру мас; τ_r, τ_p – моменти ланки ОС.

Динамічна поведінка даної моделі крокуючого апарата описується так:

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x}_{ca} \\ \ddot{y}_{ca} \\ \ddot{z}_{ca} \end{pmatrix} = (J^T) \begin{pmatrix} \tau_r \\ \tau_p \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{pmatrix},$$

де J – матриця Якобі, яка має наступне формулювання:

$$J = \frac{dp}{dq} = \begin{pmatrix} 0 & rC_p & S_p \\ -rC_r & 0 & -S_r \\ \frac{-rC_r S_r}{D} & \frac{-rC_p S_p}{D} & D \end{pmatrix}.$$

У площині x рівняння динаміки крокуючого апарата описується так:

$$m(-z_{ca}\ddot{y}_{ca} + y_{ca}\ddot{z}_{ca}) = \tau_x - mgy_{ca}, \quad \tau_x \equiv D/C_r * \tau_r.$$

Так само описуються рівняння динаміки у площинах y та z .

У публікації К. Уотта «Prioritized Multi-Task Compliance Control of Redundant Manipulators» побудовано математичну та комп'ютерну моделі АКА з антропоморфною будовою. У роботі наявні: побудова моделі; визначення поняття точки нульового моменту (T0M) та пошук її положення; визначення залежності усталеності АКА від положення його точки нульового моменту; пошук положення точки центру мас; визначення простору стану апарата, який подається векторами його просторового положення:

$$Q \times SE(3);$$

$$H_b \in SE(3);$$

$$q \in Q, Q \equiv R^n, Q \equiv T^n = S^1 \times S^1 \times \dots \times S^1,$$

де змінні векторів визначені на рис.1.12.

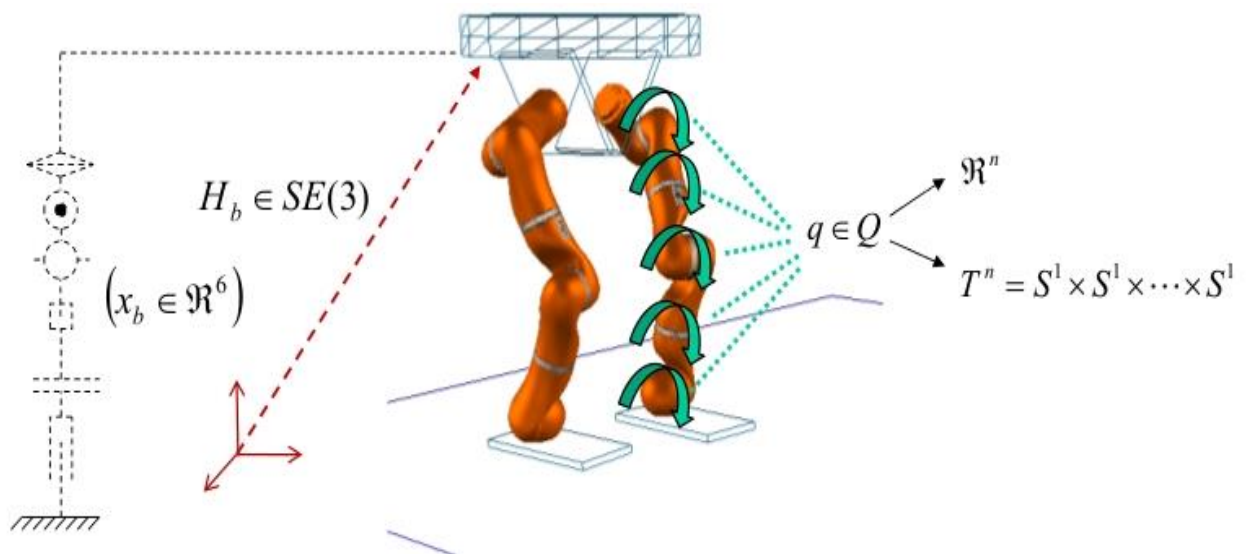


Рис.1.12. Комп'ютерна візуалізація антропоморфного крокуючого апарата із зображенням його векторів стану

Де R^6 – простір із 6 вимірів; x_b – ступінь свободи лінійного переміщення ланки відносно осі x ; H_b – базова точка моделі; $SE(3)$ – простір лінійного переміщення; q – індекс зчленування; Q – вектор стану кутів кінематичної

схеми АКА; R^n – простір із n вимірів; T^n – поданий операторною формою вектор стану АКА; S^l – матриця кутового перетворення.

Моменти в шарнірах крокуючого апарата описує наступне рівняння:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau + J(q)^T F_{ext},$$

$$F_{ext} \in R^6 [\in SE(3)].$$

У випадку зміни положення базової точки АКА, виконується наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} M_x(q) & M_{xq}(q) \\ M_{qx}(q) & M(q) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \vec{C}(q, \dot{x}_b, \dot{q}) * \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \vec{q}(x_b, q) = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_b(q)^T \\ J(q)^T \end{bmatrix} * F_{ext}.$$

1.4. Постановка задач дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності застосування антропоморфних роботизованих транспортних засобів для транспортування вантажу в умовах невизначеної поверхні. У ході дослідження необхідно виконати аналіз існуючих методів та підходів до проектування антропоморфних роботизованих транспортних засобів, аналіз їх моделей кінематики і динаміки та дослідження сучасних методів управління рухом АРТЗ. З'ясувати та розробити кінематичну структуру та модель АРТЗ для пересування по довільній поверхні. Провести оцінку впливу зовнішнього середовища на характеристики АРТЗ та його архітектуру. Визначити функціональність та архітектуру антропоморфного роботизованого транспортного засобу із урахуванням дії на нього зовнішнього середовища. Розробити стартап-проект.

Висновки до розділу

Отже, були розглянуті роботи В.В. Белецького, Е. Мейбріджа, М. А. Бернштейна, Т. Мак-Гіра, К. Чова та Д. Якобсона, М. Вукобратовича, М. Беналеге, Дж.-П. Ламонда та Е. Бертоза, Е. Чеморі, С. Крута, Е. Домбре та С.Ле-Флока, Т. Гуї, Н. Чуонга, Н. Пхонга і К. Уотта. В даних роботах авторами були описані методи подання моделей антропоморфних крокуючих апаратів, які мають такі особливості, як:

1. Поліморфізм. Модель може зображати поведінку АКА при одно- та двоопорній фазах руху;
2. Спостережуваність. Модель може в один і той самий час застосовуватися як для моніторингу, так і для управління положенням АКА.

В усіх вищенаведених моделях АКА подані з урахуванням наступних складових:

- будови кінематичних ланцюгів апарата;
- динамічної поведінки крокуючого апарата;
- взаємодії АКА з ОП;
- взаємодії АКА з системою управління та сенсорною системою.

За структурою кінематичні моделі поділяють на:

- оглядові та концептуальні (маятникові моделі, моделі взаємодії кінематичної пари ланок із середовищем, моделі взаємодії ланок у складі кінематичної пари, моделі ланок, що вимагають спеціальних методів формалізації);
- двохопорні моделі, де кінематичні пари мають птахоподібний тип згину;
- моделі антропоморфних крокуючих апаратів (моделі з дволанковими опорами та стопами, з дволанковими опорами без стоп, з невагомими ланками опор та стоп, з дволанковими опорами та дволанковими стопами, з невагомими ланками та опорами, з дволанковими опорами, стопами та корпусом, з невагомою ланкою корпусу;

- моделі з більше ніж двома опорами (триопорні моделі, триопорні моделі з опорами маятникового типу, моделі з підпорою для “руху тиранозавра”, багатоопорні моделі.

Динамічні моделі, на відміну від кінематичних, враховують сили, що зумовлюють переміщення та рух крокуючого апарата відносно нерухомої точки простору та рух його ланок одна відносно іншої. Розглянуті динамічні моделі КА ґрунтуються на використанні динаміки твердих тіл або на комп'ютерній комбінаторній динаміці. Динаміка крокуючих апаратів зазвичай описується за допомогою методів Ньютона, Ейлера, Ньютона-Ейлера, алгебри кватерніонів, рівняння Лагранжа тощо. При застосуванні комп'ютерної комбінаторної динаміки, використовується метод, поґрунтований на адаптивних нейрон-нечітких методах (*ANFIS*).

РОЗДІЛ 2: РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ АРТЗ

2.1. Кінематична структура загального вигляду АРТЗ

Завершальним етапом побудови моделі АКА має бути синтез відповідного обчислювального алгоритму, що застосовується для обчислення на ЕОМ. Даний алгоритм на вхід приймає впливи керування, і на виході дає параметри руху, що відповідають принципу керування крокуючого апарата.

Стан та поведінку групи антропоморфних крокуючих апаратів, що за кінематичною схемою один від одного майже не відрізняються. Тим часом процес адаптації моделі до кожного АКА по окремості виконується за допомогою зміни параметрів даної моделі.

Існує два підходи моделювання АКА – аналітичний та комп'ютерний. Основною особливістю використання аналітичного підходу побудови моделі АКА є змога надалі використовувати дану модель в обчислювальному експерименті, але він не є ефективним при побудові моделей складних динамічних процесів крокуючого апарата з великою кількістю ступенів свободи. Таким чином, при побудові моделі крокуючого апарата, комп'ютерний підхід зводить нанівець проблеми великої розмірності рівнянь, але так само має свої обмеження, так як даний підхід лише зображує математичний апарат, використаний у даній системі моделювання.

Для того, щоб описати структуру та поведінку крокуючого апарата та його взаємодію із навколишнім середовищем або опорною поверхнею необхідно виконати синтез аналітичної моделі кінематики і динаміки АКА, та його комп'ютерної моделі. Це у свою чергу дасть змогу виконати точний опис динаміки крокуючого апарату та вжити і випробовувати обрані підходи, методи та критерії управління АКА.

Умови, які враховуються при формалізації аналітичної моделі апарата:

- модель складається з n жорстких ланок $i=1, n$;
- в АКА ланки сполучені у кінематичні пари зчленуваннями;

- простий спосіб подання зчленувань кінематичних пар апарата;
- система координат x, y, z зв'язана з усіма ланками. Початок системи координат збігається з точкою центру мас ланки;
- усі ланки i визначаються масою m_i та тензором інерції J_i ;
- параметр d_i визначає відстань між точкою центру мас та першим (найближчим до точки фіксації) шарніром;
- однакова кількість шарнірів та ланок. Позначаються шарніри індексом $p=0, 1, \dots$;
- дистанцію між першим шарніром та усіма іншими шарнірами, що знаходяться в одному кінематичному ланцюзі, визначає довжина ланки l . Останній шарнір без параметра l . Кількість l у системі дорівнює $m, j=1, 2, \dots$;
- позиція останньої ланки визначається позицією її точки центру мас (до найбільш близького шарніра) та кутами Ейлера θ, Ψ, ϕ (зображують відношення орієнтації рухомої системи координат x, y, z до нерухомої X, Y, Z).

Першим чином задається структура моделі. Вона повинна враховувати усі види рухомості крокуючого апарату, а також його кількість ланок та ступенів свободи. Структурні матриці допомагають у завданні кількості ланок та ступенів свободи, рухомості ланок, прикладених моментів тощо. За допомогою даних матриць виконується формалізація матриці та після цього вже її опис. З цього випливає можливість описувати групу подібних моделей АКА за допомогою лише однієї відповідної моделі.

Варіанти подання структурних матриць:

- Дію ланок на моменти у зчленуваннях описує матриця ε (у випадку задання ланкою i моменту щодо зчленування: $\varepsilon_{ip}=1$, в інших випадках: $\varepsilon_{ip}=0$;
- Дію довжини l_i на породжений i -тою ланкою момент у зчленуванні p описує матриця δ (у випадку перебування довжини l_j на позитивній частині променя, що починається від даного зчленування p до

першого зчленування, що знаходиться на ланці i : $\delta_{ijp}=1$, в інших випадках: $\delta_{ijp}=0$;

- Ланки та їхні довжини сполучає матриця γ (у разі відповідності довжини l_j до ланки i : $\gamma_{ij}=1$, в інших випадках $\gamma_{ij}=0$;

Для задання моментів у шарнірі p обирається така система координат, в якій одна з осей збігається із напрямом первинної ланки та визначається спрямованим косинусом. Індеси перших двох ланок характеризують з'єднуючий їх шарнір p . Індекс первинної ланки менший. Від вектора $(l,m,n)_{p,1}$ залежатиме напрямок \cos першої осі щодо первинної ланки, від вектора $(l,m,n)_{p,2}$ – напрямок \cos другої осі щодо другої ланки, а напрям третьої осі випливає з умови її перпендикулярності до цих двох осей. Будова шарніра відповідає за вибір осей.

Матричний підхід побудови моделі АКА за допомогою аналітичного метода вимагає виконання наступних етапів:

Першими двома етапами є розрахунок кутових та лінійних переміщень ланок. Далі виконується з'ясування моментів у зчленуваннях. І в підсумку формується рівняння руху.

У рухомій системі координат x,y,z по відношенню до координат нерухомої системи X,Y,Z , кутове переміщення ланок виконується наступним чином:

$$\begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \Psi \\ \Theta \end{bmatrix} \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix}, \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} [\Theta] = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{bmatrix} [\Psi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ 0 & -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} [\Phi]$$

Кутова швидкість формується у вигляді першої похідної від пересування:

$$\begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = \begin{matrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} + \begin{matrix} 0 \\ [\psi] \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{matrix} \equiv \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = [\pi] \begin{matrix} \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{matrix}, \quad (2.2)$$

$$[\pi] = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & 1 \\ \sin(\psi)\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ \sin(\psi)\cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \end{pmatrix}.$$

Похідна від кутової швидкості формується рівнянням:

$$\begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} = \frac{d}{dt} \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ [\pi] \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix}, \text{ або } \begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} = [\pi] \begin{matrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{matrix} + [\pi_1] \begin{matrix} \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \dot{\phi}\dot{\theta} \\ \dot{\theta}\dot{\psi} \end{matrix}, \quad (2.3)$$

Матриця π_1 подана наступним чином:

$$[\pi_1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin(\psi) \\ -\sin(\phi) & \sin(\psi)\cos(\phi) & \cos(\psi)\sin(\phi) \\ -\cos(\phi) & -\sin(\psi)\sin(\phi) & \cos(\psi)\cos(\phi) \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Зовнішні моменти, які призводять до появи кутового руху ланок, зображені як проекції на осі x, y, z . Таким чином кутові моменти ланок подаються у вигляді матриці:

$$\begin{matrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{matrix} = \begin{matrix} \omega_x \\ [J] \omega_y \\ \omega_z \end{matrix}, \quad (2.5)$$

де $[J]$ виступає у якості тензора інерції ланки:

$$[J] = \begin{pmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Наступним чином формується кутовий момент:

$$\begin{matrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{matrix} = \frac{d}{dt} \begin{matrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{matrix} + [\omega] \begin{matrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{matrix}, \text{ де } [\omega] = \begin{matrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{matrix}. \quad (2.7)$$

Так як після проведеного диференціювання осі x, y, z не міняють своїх напрямів, отримуємо наступне формулювання кутових моментів:

$$\begin{matrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{matrix} = \begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} + [\omega] \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix}, \text{ або } \begin{matrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{matrix} = \begin{matrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{matrix} + [J_1] \begin{matrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \end{matrix} + [J_2] \begin{matrix} \omega_y \omega_z \\ \omega_z \omega_x \\ \omega_x \omega_y \end{matrix}, \quad (2.8)$$

де $[J_1]$ та $[J_2]$ – матриці виду:

$$[J_1] = \begin{matrix} 0 & -J_{xy} & J_{yz} \\ J_{zx} & 0 & -J_{xz} \\ -J_{yz} & -J_{xy} & 0 \end{matrix}, [J_2] = \begin{matrix} J_{zz} - J_{yy} & J_{yz} & -J_{zx} \\ -J_{xy} & J_{xx} - J_{zz} & J_{zy} \\ J_{xz} & -J_{yz} & J_{yy} - J_{xx} \end{matrix}. \quad (2.9)$$

Оскільки положення ТЦМ апарата (задається довжиною l та відстанню d) визначає опис його лінійного переміщення ланок, довжина ланки l визначається вектором, орієнтованим від базового до інших зчленувань даної ланки. Кожна ланка, що не є кінцевою, має як мінімум один вектор l . Їх індекси не підпорядковані індексам ланок і зображуються як $l_j (j=1, 2, \dots, m)$. Відстань d формулюється вектором \vec{d} , орієнтованим від базового зчленування до точки центру мас ланки. Усі ланки складається з одного вектора \vec{d} , що зображується у вигляді $d_i (i=1, 2, \dots, n)$. На проекціях осі x, y, z компоненти векторів l та d є незмінними у часі, але на проекціях X, Y, Z вони залежать від значень кутів Ейлера, що робить їх змінними у часі. Трансформація компонентів векторів l та d від рухомої до нерухомої систем координат має наступне подання:

$$\begin{matrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{matrix} = [\theta][\psi][\phi] \begin{matrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{matrix}; \begin{matrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{matrix} = [\theta][\psi][\phi] \begin{matrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{matrix}. \quad (2.10)$$

Друга похідна вектора l щодо осей X, Y, Z зображується як:

$$\begin{pmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{pmatrix} = \frac{d^2}{dt^2} \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Або таким чином:

$$\begin{pmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = [\Theta_2][\Psi][\Phi]\dot{\Theta} + [\Theta][\Psi_2][\Phi]\dot{\Psi}^2 + [\Theta][\Psi][\Phi]\dot{\Phi} + 2[\Theta][\Psi_1][\Phi_1]\dot{\Psi}\dot{\Phi} + \\ + 2[\Theta_1][\Psi][\Phi_1]\dot{\Psi}\dot{\Theta} + \\ + 2[\Theta_1][\Psi_1][\Phi]\dot{\Theta}\dot{\Psi} + [\Theta_1][\Psi][\Phi]\ddot{\Theta} + [\Theta][\Psi_1][\Phi]\ddot{\Psi} + [\Theta][\Psi][\Phi_1]\ddot{\Phi}. \quad (2.12)$$

Матриці $[\Theta_1], [\Theta_2], [\Psi_1], [\Psi_2], [\Phi_1], [\Phi_2]$ утворюють від матриць $[\Theta], [\Psi], [\Phi]$ наступні похідні:

$$[\Theta_1] = \frac{d}{d\Theta} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{pmatrix}, [\Theta_2] = \frac{d^2}{d\Theta^2} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2.13)$$

$$[\Theta_1] = \frac{d}{d\Theta} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{pmatrix}, [\Theta_2] = \frac{d^2}{d\Theta^2} [\Theta] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & -\cos(\theta) \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

$$[\Phi_1] = \frac{d}{d\Phi} [\Phi] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \\ 0 & -\cos(\phi) & -\sin(\phi) \end{pmatrix}, [\Phi_2] = \frac{d^2}{d\Phi^2} [\Phi] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Вираз 2.12 має також і простішу форму подання:

$$\begin{pmatrix} \ddot{l}_x \\ \ddot{l}_y \\ \ddot{l}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\Theta} & \dot{\Theta}^2 & \dot{\Psi}\dot{\Phi} \\ [A][\Lambda]\ddot{\Psi} & [B][\Lambda]\dot{\Psi}^2 & [C][\Lambda]\dot{\Phi}\dot{\Theta} \\ \ddot{\Phi} & \dot{\Phi}^2 & \dot{\Theta}\dot{\Phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

де:

$$\begin{aligned}
[A] &= \begin{bmatrix} [\Theta_1] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi] \end{bmatrix}, \\
[B] &= \begin{bmatrix} [\Theta_2] & [\Psi] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi_2] & [\Phi] \\ [\Theta] & [\Psi] & [\Phi_2] \end{bmatrix},
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

$$[C] = 2 * \begin{bmatrix} [\Theta] & [\Psi_1] & [\Phi_1] \\ [\Theta_1] & [\Psi] & [\Phi_1] \\ [\Theta_1] & [\Psi_1] & [\Phi] \end{bmatrix}.$$

Матриці $[A]$, $[B]$ і $[C]$ являються функціями кутів Ейлера θ, ψ, ϕ і є відповідними до ланки з довжиною l_j .

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} l_x & 0 & 0 \\ l_y & 0 & 0 \\ l_z & 0 & 0 \\ 0 & l_x & 0 \\ 0 & l_y & 0 \\ 0 & 0 & l_x \\ 0 & 0 & l_y \\ 0 & 0 & l_z \end{bmatrix}.
\tag{2.18}$$

Прискорення ланки визначає друга похідна вектора d щодо осей X, Y, Z і описується наступним чином:

$$\begin{bmatrix} \ddot{d}_x \\ \ddot{d}_y \\ \ddot{d}_z \end{bmatrix} = \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} [\Theta] & [\Psi] & [\Phi] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}.
\tag{2.19}$$

Відносно координат зчленування p , $(X, Y, Z)_{ip}$ є координатою центру мас ланки i . Центр мас даної ланки являє собою суму усіх довжин l (від першого

зчленування до вказаного) з відстанню d . Використавши структурні матриці $[\varepsilon]$ та $[\delta]$ дистанція між ТЦМ та відповідними ланками матиме вигляд:

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z_{ip} \end{matrix} = \begin{matrix} d_X \\ \varepsilon_{ip} d_Y \\ d_{Z_i} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} l_X \\ \delta_{ijp} l_Y \\ l_{Z_j} \end{matrix}. \quad (2.20)$$

Вираз $\varepsilon_{ip}=1$ визначає члени структурних матриць у випадку існування в ланці i моменту щодо зчленування p , в інших випадках вираз матиме вигляд $\varepsilon_{ip}=0$; У випадку перебування довжини l_j на позитивній частині променя p , яка орієнтована у бік першого зчленування на ланці i буде дійсним вираз $\delta_{ijp}=1$, – в інших випадках вираз матиме вигляд $\delta_{ijp}=0$.

Нульовим зчленуванням ($p=0$) прийнято вважати центральну точку опори, що закріплена у просторі. Отже, відповідно до рівняння (2.20), розрахунок дистанції між центральними точками опори має наступне формулювання:

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z_{i0} \end{matrix} = \begin{matrix} d_X \\ d_Y \\ d_{Z_i} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} l_X \\ \delta_{ij0} l_Y \\ l_{Z_j} \end{matrix}, \varepsilon = 1. \quad (2.21)$$

Якщо продиференціювати рівняння (2.21) можна буде отримати прискорення точки центру мас i -тої ланки, дане рівняння матиме вигляд:

$$\begin{matrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z}_i \end{matrix} = \begin{matrix} \ddot{d}_X \\ \ddot{d}_Y \\ \ddot{d}_{Z_i} \end{matrix} + \sum_{j=1}^m \begin{matrix} \ddot{l}_X \\ \delta_{ij0} \ddot{l}_Y \\ \ddot{l}_{Z_j} \end{matrix}. \quad (2.22)$$

Формулювання гравітаційного моменту ланки щодо зчленування подається у вигляді:

$$Mg = -m_i[X]_{ip} \begin{matrix} 0 \\ 0. \\ g \end{matrix}$$

Отже, формулювання загального моменту щодо зчленування p із зважанням на анти-гравітаційний момент матиме вигляд:

$$\begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Z_p} \end{matrix} = \sum_{i=1}^n \begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Z_{ip}} \end{matrix} + \sum_{i=1}^n \begin{matrix} M_X \\ \varepsilon_{ip} M_Y \\ M_{Z_i} \end{matrix} + \sum_{i=1}^n \begin{matrix} 0 \\ m_i X_{ip} \\ g \end{matrix}. \quad (2.23)$$

Для того, щоб обрахувати моменти ланки i , треба підставити рівняння (2.12) та (2.15) у рівняння (2.23). Виходячи з цього рівняння (2.23) матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \begin{matrix} M_X \\ M_Y \\ M_{Z_p} \end{matrix} &= \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} \sum_{k=1}^n \begin{matrix} \ddot{\theta} \\ \gamma_{kj}[A]_k[\Lambda]_j \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi}_x \end{matrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} [B]_i[\Lambda]_i \begin{matrix} \dot{\theta}^2 \\ \dot{\psi}^2 \\ \dot{\phi}_i^2 \end{matrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} \sum_{j=1}^m \delta_{ij0} \sum_{k=1}^n \begin{matrix} \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \gamma_{kj}[C]_k[\Lambda]_j \dot{\phi}\dot{\theta} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}_k \end{matrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} [C]_i[\Lambda]_i \begin{matrix} \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \dot{\phi}\dot{\theta} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}_i \end{matrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} [A]_i[\Lambda]_i \begin{matrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi}_i \end{matrix} + \\ &+ \sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} \sum_{j=1}^m \delta_{ij0} \sum_{k=1}^n \begin{matrix} \dot{\theta}^2 \\ \gamma_{kj}[B]_k[\Lambda]_j \dot{\psi}^2 \\ \dot{\phi}^2 \end{matrix} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [D]_i \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\phi}_i} + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [E]_i \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\phi}_i^2} + \\
& + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ip} [F]_i \frac{\dot{\psi}\dot{\phi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_i} + \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \frac{0}{g}.
\end{aligned}$$

Якщо поміняти порядок додавання елементів з потрійними сумами в останньому рівнянні та використати просту форму запису, можна спростити вираз до вигляду:

$$[S]_{ip} = \sum_{i=1}^n \delta_{ij0} m_i [X]_{ip}. \quad (2.24)$$

В інших обрахунках проводимо заміну індексів суми i на рівнозначні k . Таким чином отримуємо кінцевий вигляд зображення загального моменту в зчленуванні p :

$$\begin{aligned}
\frac{M_X}{M_Y} &= \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [A]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [A]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [D]_k) \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\phi}_k} + \\
& + \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [B]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [B]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [E]_k) \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\phi}_k^2} + \\
& + \sum_{k=1}^n (m_k [X]_{kp} [C]_k [\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj} [S]_{jp} [C]_k [\Lambda]_j + \varepsilon_{kp} [F]_k) \frac{\dot{\psi}\dot{\phi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_k} + \sum_{i=1}^n m_i [X]_{ip} \frac{0}{g}.
\end{aligned} \quad (2.25)$$

Моменти усіх зчленувань мають фіксоване положення у просторі та мають зв'язок з суміжними ланками. Задля спрощення запису здійснимо наступні перетворення:

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[A]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[A]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{kp}[D]_k) = [AA]_{pk},$$

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[B]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[B]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{kp}[E]_k) = [BB]_{pk},$$

$$[\alpha]_p^{-1}(m_k[X]_{kp}[C]_k[\Delta]_k + \sum_{j=1}^m \gamma_{kj}[S]_{jp}[C]_k[\Delta]_j + \varepsilon_{kp}[F]_k) = [CC]_{pk},$$

$$\sum_{i=1}^n m_i[X]_{ip} \begin{matrix} 0 \\ g \end{matrix} = [G]_p, \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \\ M_{3p} \end{matrix} = M_p.$$

Таким чином буде виглядати скорочена форма подання рівняння моментів усіх зчленувань p :

$$[M]_p = \sum_{k=1}^n [AA]_{pk} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\phi}_k} \ddot{\psi} + \sum_{k=1}^n [BB]_{pk} \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\phi}_k^2} \dot{\psi}^2 + \sum_{k=1}^n [CC]_{pk} \frac{\dot{\psi}\dot{\phi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_k} \dot{\phi}\dot{\theta} + [G]_p, \quad (2.26)$$

Задля утворення закону руху здійснимо наступні перетворення:

$$[AA]_{pk} = [A], [BB]_{pk} = [B], [CC]_{pk} = [C],$$

$$\frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\phi}_k} \ddot{\psi} = [\ddot{\theta}], \frac{\dot{\theta}^2}{\dot{\phi}_k^2} \dot{\psi}^2 = [\dot{\theta}^2], \frac{\dot{\psi}\dot{\phi}}{\dot{\theta}\dot{\psi}_k} \dot{\phi}\dot{\theta} = [\dot{\theta}\dot{\theta}], \quad (2.27)$$

$$[M]_p = M, [G]_p = [G].$$

Таким чином отримуємо можливість формування закону руху багатоланкового апарату, який буде поданий у вигляді рівняння:

$$[M] = [A][\ddot{\theta}] + [B][\dot{\theta}^2] + [C][\dot{\theta}\dot{\theta}] + [G]. \quad (2.28)$$

У результаті формалізації закону руху апарата (рівняння 2.3 – 2.28) стає можливим моделювання АКА з довільною кількістю ланок, дві з яких дотикаються до ОП. При цьому враховується: лінійне переміщення, кутове переміщення, моменти в шарнірах та закон руху.

Однак, через низьку наочність та математичну складність, його практичне застосування обмежується розв'язанням задач, пов'язаних з інтеграцією моделі до об'єкта управління (за принципом *HIL* чи *PIL*).

Таким чином, запропонована аналітична модель динаміки АКА, що побудована на основі кінематичної схеми і базується на застосуванні методів кутів Ейлера, рівнянні Лагранжа та основних засадах аналітичної динаміки, може застосовуватися для опису динамічної поведінки АКА, зокрема для дослідження параметрів динаміки апарата у граничних положеннях його кінематичних властивостей, проте модель не може застосовуватися для дослідження взаємодії АКА з апостеріорною ОП. Для врахування взаємодії моделі АКА з ОП необхідно формалізувати ОП та включити її до складу моделі АКА. Принагідно зазначимо, що така інтеграція передбачає апріорність ОП, а це не відповідає умовам експлуатації моделі. Тому для врахування взаємодії ОП з АКА потрібно застосувати методи моніторингу та аналізу ОП, які дають змогу отримувати інформацію попередньо або одночасно з взаємодією АКА з ОП.

Для забезпечення можливості відтворення взаємодії АКА з ОП потрібно застосовувати методи з гнучкими властивостями моделювання (*Multibody Dynamics*), що характерно для комп'ютерних методів моделювання.

Комп'ютерні методи моделювання об'єктів та систем (*Multibody Dynamics*) відрізняються від аналітичних гнучкістю побудови складних систем і простотою застосування в комплексних моделях, які

складаються з: кінематичної моделі, динамічної моделі, системи управління та системи зворотного зв'язку. Математичні методи, що застосовуються у комп'ютерній моделі, можуть не відрізнятися від їх аналітичних аналогів.

Для дослідження АКА методом комп'ютерного моделювання, побудуємо демонстраційну моделі, що складається з п'яти пов'язаних між собою шарнірами ланок, заданих у двовимірному просторі x, y . Модель складається з корпусу та двох дволанкових опор. Загальний структурний вигляд моделі показано на рис. 2.1(а).

Формалізація процесу переміщення апарата у площині x, y , може бути представлена з 7 ступенями свободи, вектор стану якої має такий вигляд:

$$q = [x_0, y_0, \alpha, \beta_L, \beta_R, \gamma_L, \gamma_R]^T.$$

Координати x_0, y_0 визначають положення ТЦМ корпусу АКА, а інші параметри вектора q задають кути в шарнірах апарата. Також до властивостей моделі додано параметри довжин ланок (l_0, l_1, l_2) , маси кожної з ланок (m_0, m_1, m_2) , (що відповідають довжинам, згідно з індексами) та положення точок – центрів мас ланок (r_0, r_1, r_2) , які задані за відстанню до найближчого шарніра.

Динамічні властивості моделі описані за допомогою кутових моментів у шарнірах. Загальна рухомість АКА задана вектором:

$$M = [M_{L1}, M_{R1}, M_{L2}, M_{R2}]^T,$$

де моменти M_{L1}, M_{R1} задають рухомість корпусу АКА відносно його ніг, а моменти M_{L2}, M_{R2} задають рухомість бедер АКА відносно його гомілок (рис. 2.1(б)).

Для опису взаємодії моделі АКА з навколишнім середовищем, зокрема з ОП, до складу моделі введений вектор сил:

$$F = [F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}]^T,$$

де сили F_{Lx}, F_{Ly} задають вплив на ліву опору апарата; сили F_{Rx}, F_{Ry} описують вплив на праву його опору.

За допомогою рівнянь Лагранжа рівняння динаміки комп'ютерної моделі АКА буде мати такий вигляд:

$$A(q)\ddot{q} = b(q, \dot{q}, M, F),$$

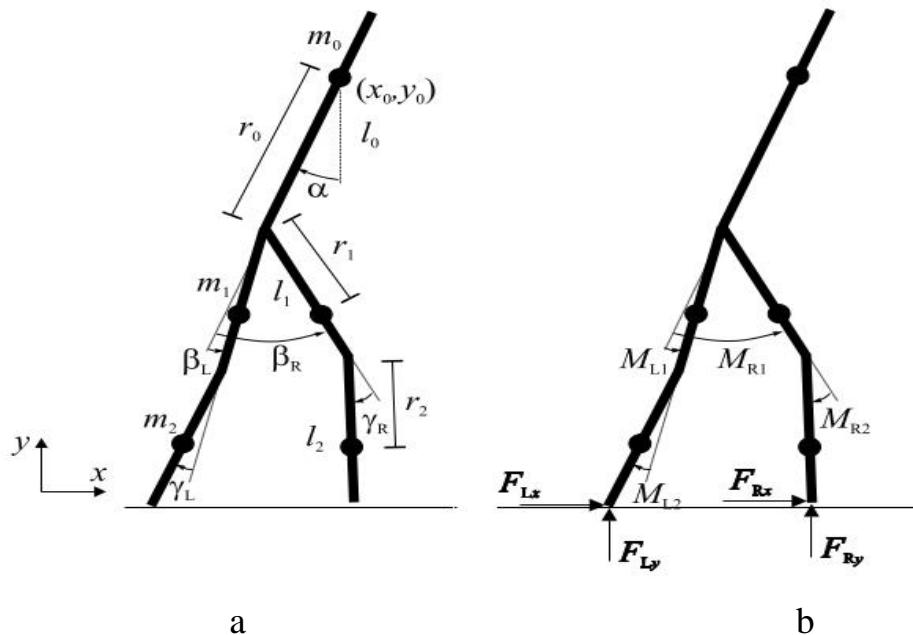


Рис.2.1. Загальна схема п'ятиланкової плоскої моделі АКА

Де a – схема розташування ланок та міжланкових кутів; b – схема розташування та значення кутових моментів; x, y – базова система координат; m_0, m_1, m_2 – маси ланок АКА; r_0, r_1, r_2 – відстані від шарнірів до ТЦМ ланок; l_0, l_1, l_2 – довжини ланок апарата; x_0, y_0 – положення ТЦМ АКА; α, β, γ – кути кінематичних пар ланок апарата; $F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}$ – сили ковзання і реакції ОП для лівої і правої ноги АКА.

Окремою складовою комп'ютерної моделі є модель ОП. Опорна поверхня для руху АКА моделюється як набір координат x, y , які задають точки ОП і формують лінії траєкторії на ній. Для реалістичної формалізації сили реакції ОП модель АКА містить PD -регулятор, що відіграє роль демпфера під час проникнення ланки стопи АКА в ОП. Моніторинг

сили реакції ОП може бути зчитаний та проаналізований за величиною вихідної функції PD -регулятора в такій формі:

$$F_n = -k_y y'_G - b_y \dot{y}'_G,$$

де: \dot{y}'_G – поточне “проникнення” ланки стопи АКА в ОП відносно осі y ; k_y – константа пружності ОП у точці дотику ланки стопи; b_y – константа демпфування.

Значення F_n набуває актуальності лише під час дотику стопи до ОП. У іншому разі величина сили буде або негативною, або нульовою.

Тангенціальна складова сили взаємодії з ОП F_t викликана тертям. Для її моделювання також застосовано PD -контролер. Для опису F_t відносно початкової точки \dot{x}_0 застосовано такий вираз:

$$F_t = -k_x (x'_G - x'_0) - b_x \dot{x}'_G,$$

де: k_x, b_x – константи тангенціальної взаємодії з ОП за параметрами пружності та демпфування, відповідно. У випадку, якщо фактична сила перевищує максимальну силу тертя, то таке ковзання описується рівнянням:

$$F_{t,max} = \mu_s F_n,$$

де μ_s – коефіцієнт шорховатості ОП.

Зазначені підходи до аналітичного та комп'ютерного моделювання АКА описують статичне положення і динамічну поведінку апарата. Застосовані аналітичні методи дають змогу аналізувати результати взаємодії внутрішніх сил і моментів АКА та зовнішніх сил і моментів, які діють на апарат. Комп'ютерні методи моделювання дають змогу застосовувати алгоритм управління апаратом у режимі реального часу, в тому числі з врахуванням взаємодії з ОП.

Водночас, у зв'язку з універсальністю формалізованої моделі, її застосування для управління ustalеним рухом апарата є неможливим. Це

пояснюється відсутністю формалізованого зв'язку між рельєфністю ОП та моделлю ОП.

Для управління усталеним рухом АКА з врахуванням рельєфності ОП аналітичну та комп'ютерну моделі АКА необхідно реорганізувати. Для цього базова система координат комп'ютерної моделі апарата повинна співпадати з ТЦМ корпусу, а координати точки дотику стоп АКА до ОП визначатися відповідно до рельєфності ОП, що дасть змогу описувати ОП як окрему комп'ютерна модель з змінними характеристиками екстремумів рельєфу.

2.2. Оцінка впливу навколишнього середовища на характеристики роботизованого засобу та його архітектуру

Моніторинг розподілу сили реакції ОП дає змогу визначати положення ТПЦМ АКА на ОП. Проте дані про розподіл сили реакції однозначно характеризують лише положення ТЦМ, тоді як положення ТПЦМ залежатиме від динамічної поведінки АКА, зокрема, від його інерційності. Так, в умовах однакової кінематичної структури апарата і при ідентичній позиції його ланок розподіл сили реакції ОП і координати ТПЦМ залежать від його динамічної поведінки. Координати ТПЦМ АКА у статичному положенні на рис. 2.2(*a*), а з врахуванням розподілу сили реакції ОП показано на рис. 2.2(*c*). Тоді положення ТПЦМ під час руху АКА знаходитиметься в певній зоні, як це показано на рис. 2.2(*b*), а відповідний розподіл сили реакції ОП буде виглядати так, як показано на рис. 2.2(*d*).

Для моніторингу положення ТЦМ та ТПЦМ АКА в роботі показано, що якщо всі елементарні сили реакції звести в точці центру стопи АКА, то можна однозначно визначити силу N та момент M взаємодії АКА з ОП з врахуванням динамічних властивостей апарата.

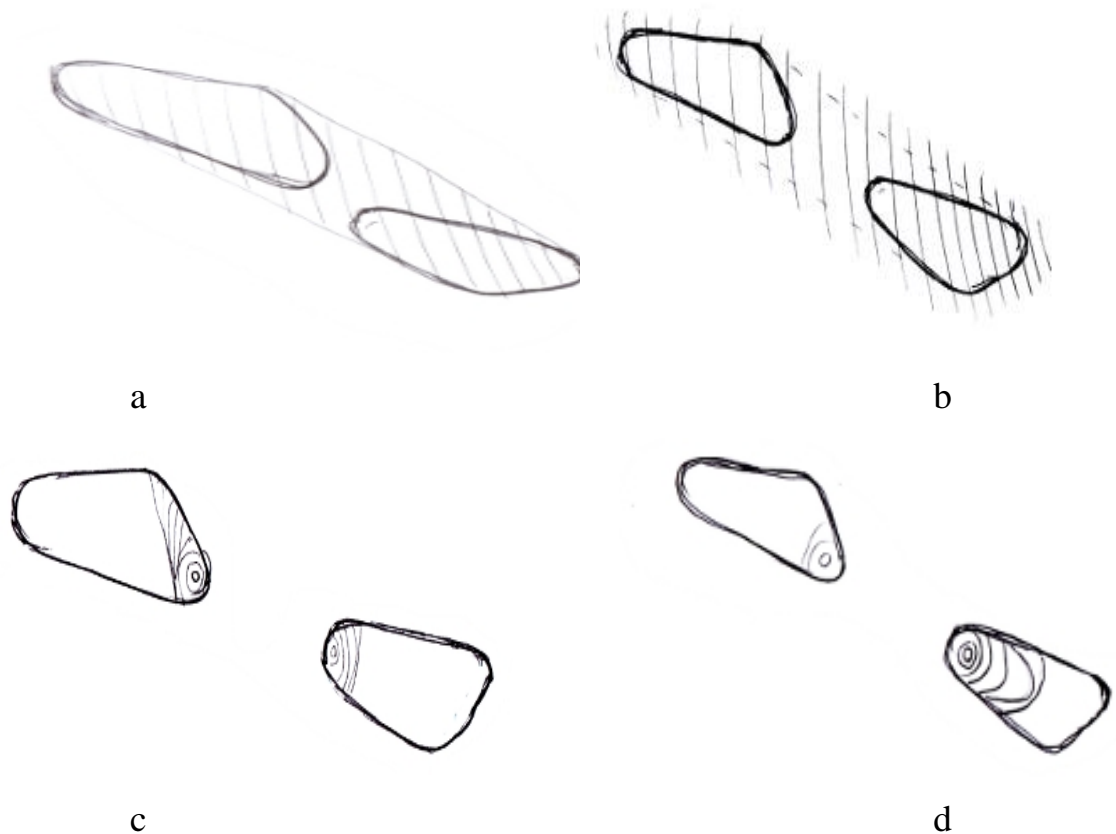


Рис. 2.2. Характеристика взаємодії АКА з ОП: а – положення ТЦМ при статичній фазі; б – положення ТЦМ при динамічній фазі; с – розподіл сил реакції ОП при статичній фазі; d – розподіл сил реакції ОП при динамічній фазі.

Варто відзначити, що при одноопорній фазі руху Т0М (у канонічній динаміці АКА) не може виходити за межі контуру стопи апарата, а при двоопорній – Т0М не може виходити за контур, що зображено на рис.2.3. У іншому випадку, якщо Т0М знаходиться за межами контуру стопи, сила реакції ОП буде направлена вниз, що правомірно при більшості положень ланок АКА. Таким чином, під час руху АКА Т0М буде знаходитись в зоні з подвійною штриховою, при двоопорній фазі руху, а в двоопорній фазі – в зоні з простою штриховою (рис.2.3), при одноопорній фазі руху. У межах цих границь Т0М може рухатися за різними законами (стрибками або плавно) в залежно від методів реалізації руху апарата.

Проведений моніторинг положення Т0М, ТПЦМ, та сили реакції ОП дає змогу формувати умови дотримання усталеного положення апарата на різних типах ОП. Однак для застосування цих умов потрібно побудувати відповідні моделі апаратів, які відповідають антропоморфній структурі і поведінці та застосовують дані про Т0М, ТПЦМ і розподіл сили реакції ОП для знаходження умов дотримання усталеного руху.



Рис.2.3. Границі можливого положення Т0М |при двоопорній фазі руху АКА

2.3. Розробка і дослідження варіантів архітектури АРТЗ з урахуванням його взаємодії з навколишнім середовищем. Кінематична модель для пересування по довільній поверхні

Кінематична модель антропоморфного роботизованого транспортного засобу (АРТЗ) як і його динамічна поведінка задані таким чином, щоб якнайкраще виконувати задачу переміщення корисного вантажу на неоднорідній, складній але твердій опорній поверхні (ОП), що є типовою для ґрунтової дороги, лісистій місцевості чи поверхні покритої бетоном. Концепція "антропоморфності", що запроваджена в АРТЗ, спрямована на підвищення прохідності засобу в умовах, що є характерними для людини. Кінематична модель опорно-рухового апарату (ОРА) АРТЗ задана таким чином, аби оптимізувати енерговитратність і збільшити запас стійкості засобу в його статичних та динамічних фазах руху. Задля цього, у якості біологічної моделі ОРА обрано птахоподібну форму ланок, що засобами шарнірів об'єднані у єдину систему абсолютно-твердих тіл. Узагальнену структуру моделі ОРА показано на рис.2.4.

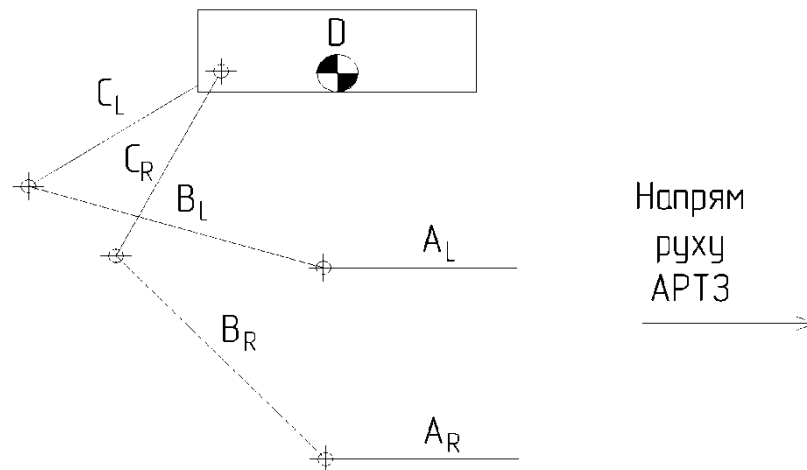


Рис.2.4. Узагальнена структура моделі ОРА для АРТЗ

Де: A_{RL} , B_{RL} , C_{RL} , D – ланки моделі ОРА;

α_{RL} , β_{RL} , γ_{RL} , δ_{RL} – кути кінематичних пар АРТЗ.

Структура АРТЗ, що показана на рис.2.4 характеризується відносно безопорної фази руху, коли засіб рухається за принципом керованого падіння. Рух АРТЗ передбачає стратегію постійної підтримки стійкого положення на поверхні руху. Така стратегія полягає у дотриманні точкою проєкції центру мас координатного положення, що співпадає з контуром однієї опори. Завдяки цьому рух виробу передбачає послідовну зміну функцій кінцівок (опорні функція і функція передньої ноги).

Функція опорної ноги передбачає формування положення опори так, щоб сили, які прикладені і діють на АРТЗ збалансовувалися. При цьому положення ланки D залишається постійним.

Функція передньої ноги полягає у забезпеченні траєкторії подальшого руху та у підтриманні контактної взаємодії між ланкою стопи (A) та ОП. При цьому, контактна взаємодія будуватиметься на стійкій кінематичній конфігурації дотику по трьох спільних (для ланки A та ОП) точках.

Зміна функціях кінцівок АРТЗ є циклічною і полягає у переміщенні ланки D засобами шарнірів у кутах α , β , γ , δ (рис.2.4) відповідно до обраної стратегії стійкості, яка полягає у невиході точки проєкції центру мас АРТЗ за

контур обох стоп (ланок A_R і A_L), що формують неперервну доріжку слідів, яка показана на рис.2.5.

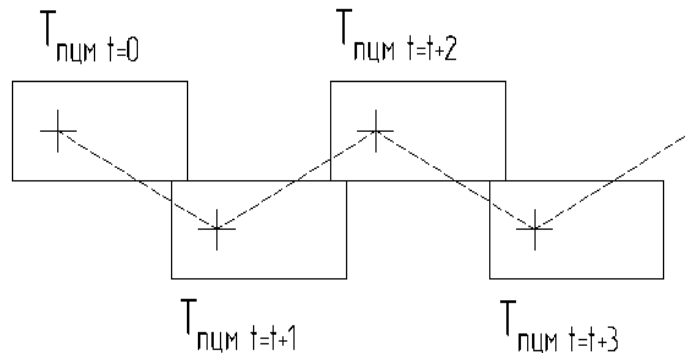


Рис.2.5. Неперервний слід ланок стоп АРТЗ на опорній поверхні

Де: $T_{пцм}$ – положення точки проекції центру мас у часові моменти $t=0, t=1, t=2, \dots, t=n, n \in \mathbb{Z}$.

Завдяки тому, що точка проекції центру мас переміщується у контурі стопи, у законі управління рухом можна знехтувати масами ланок A_{RL} , B_{RL} , C_{RL} , а масу корисного вантажу та корпусу АРТЗ включити у масу ланки D .

Таким чином, кінематична схема у аналітичній формі матиме вигляд, що показаний на рис.2.6.

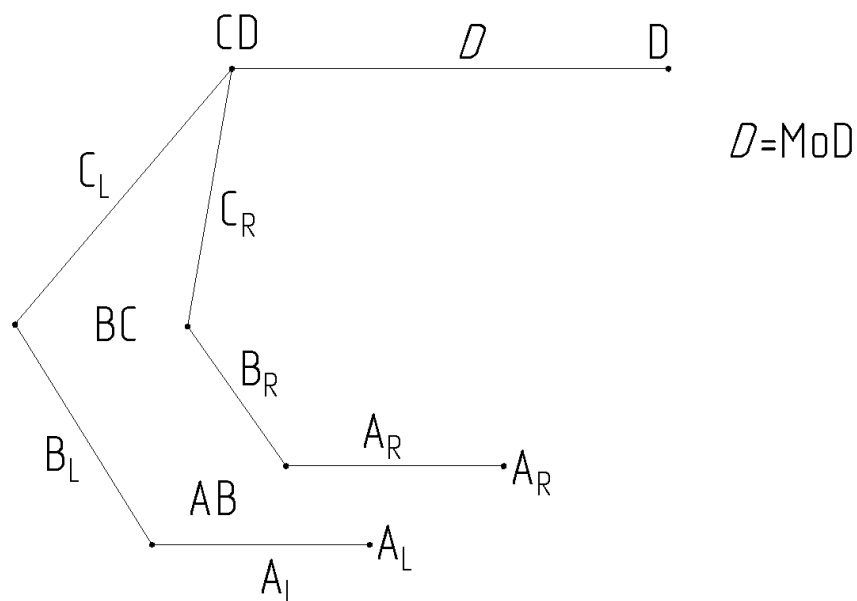


Рис.2.6. Структурна схема АРТЗ

Де: A_{RL} , B_{RL} , C_{RL} – ланки опор; D – ланка корпусу; D – точка прикладення мас;
 CD , BC , AB – координати шарнірів між ланками.

Вектор, що задає положення ланок, описується так:

$$y = \begin{bmatrix} A_{Lx} & A_{Rx} & AB_{Lx} & AB_{Rx} & BC_{Lx} & BC_{Rx} & CD_x & D_x \\ A_{Ly} & A_{Ry} & AB_{Ly} & AB_{Ry} & BC_{Ly} & BC_{Ry} & CD_y & D_y \\ A_{Lz} & A_{Rz} & AB_{Lz} & AB_{Rz} & BC_{Lz} & BC_{Rz} & CD_z & D_z \end{bmatrix},$$

Або

$$y = \begin{bmatrix} \overline{A_L} & \overline{A_R} & \overline{AB_L} & \overline{AB_R} & \overline{BC_L} & \overline{BC_D} & \overline{CD} & \overline{D} \end{bmatrix}.$$

Висновки до розділу

В даному розділі був проведений аналіз аналітичного та комп'ютерного моделювання АКА, проведена оцінка впливу навколишнього середовища на характеристики роботизованого засобу та його архітектуру, а також досліджені варіанти архітектури АРТЗ з урахуванням його взаємодії з навколишнім середовищем. Розглянута кінематична модель для пересування по довільній поверхні.

РОЗДІЛ 3: ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ТА АРХІТЕКТУРИ АРТЗ

3.1. Функціональність АРТЗ

Функціональність може бути основою для визначення конструктивних особливостей антропоморфного засобу як апарату, який виключно використовується для транспортування вантажів.

Антропоморфність визначає подібність до людини, але ступінь цієї подібності однозначно не визначена – це може бути крокуючий апарат, який перевозить вантаж на візку, який позаду робота, чи являє єдину конструкцію з візком чи можуть мати інші варіанти конструкцій.

Для більшості варіантів АРТЗ можна визначити базовий перелік функцій, які їм притаманні, у вигляді наступного переліку:

- мати можливість пересувати вантажі, які мають обмеження в габаритах і у вазі;
- вміти виконувати операції завантаження/розвантаження своїми засобами;
- вміти обирати маршрут при появі нової перешкоди на шляху його переміщення для їх огинання;
- вміти пересуватися по довільній поверхні (на спусках та підйомах);
- вміти відновлювати вантаж на місці при перекиданні робота чи його візка;
- вміти маневрувати на основі своїх розрахунків точки перетину його траєкторії руху з траєкторією іншого рухомого об'єкту;
- вміти знаходити вихід із ситуацій, коли, наприклад, застрягає колесо візка чи кінцівка АРТЗ;
- вміти визначити позаштатність ситуації, проаналізувати і прийняти рішення щодо яких потребує інтелектуальних компонентів;

- виявляти появу і завершення подій відносно АРТЗ, робити їх аналіз, їх належність до якоїсь категорії відповідно класифікаторів;
- вміти орієнтуватися в близькому навколишньому просторі на основі сигналів сенсорної системи та їх відповідної обробки;
- вміти визначати та аналізувати типові ситуації, які складаються між АРТЗ і навколишнім середовищем та його об'єктами;
- моніторити та зберігати дані про події, ситуації, які фіксують системи АРТЗ;
- мати механізми вертикальної та курсової стабілізації.

Щодо управління на рівні «гомеостатичних» для робота параметрів, то можна надати такий перелік критичних характеристик:

- вертикального відхилення – кут крену/ кут завалу;
- курсові параметри переміщення (дистанція до цілі/ дистанція до найближчої перешкоди / кутова похибка/ дані GPS, магнітометру, гіроскопу та акселерометру);
- запис параметрів руху:
 - для автономного переміщення (% зарядки акумуляторних батарей);
 - для переміщення з кабелем (% використаної довжини);
- висота точки центру мас (ТЦМ) чи точки розподіленого центру мас (ТРЦМ);
- вагові характеристики АРТЗ з вантажем та без нього (m_{max} вага/ реальна вага);
- вектор тягових зусиль АРТЗ при переміщенні;
- вектор моменту інерції при переміщенні;
- довжина гальмівного шляху АРТЗ (для різних варіантів конструкцій);
- граничні параметри і характеристики:
 - тягового зусилля АРТЗ;

- зони дії маніпуляторів;
- кутів підйому / спуску;
- радіусу розвороту та кута повороту АРТЗ з вантажем;
- тах струму силових пристроїв (допустимий / реальний);
- кута повороту тіла з маніпуляторами;
- мінімальний залишок ємності батарей живлення.

Функціональність щодо обробки та оцінювання параметрів консолідованого управління:

- управління рухом АРТЗ:
 - управління прямолінійним рухом;
 - управління ногами;
 - управління окремими ланками ноги;
 - управління стопою ноги;
 - управління з поворотом;
 - управління при русі «назад»;
- управління маніпуляторами АРТЗ:
 - управління правим/ лівим маніпуляторами;
 - управління кістю (схватом) маніпулятора;
 - управління окремими ланками маніпулятора;
- управління поворотом тулуба АРТЗ (в горизонтальній площині навколо осі Z);
- управління процесом завантаження /розвантаження;
- управління щупом АРТЗ (для уточнення стану обмеженої поверхні);
- критерії та цільові функції управління;
- алгоритми прийняття рішення з управління в нових зовнішніх умовах;
- алгоритми консолідованого управління.

Послідовність дій АРТЗ в довільній точці траєкторії

1) Визначення місця розташування вантажу (див. п.0.1).

2) Операції щодо транспортного візка.

Визначення вірного положення візка:

- візок перекинувся (потрібна корекція);
- візок стоїть на колесах (перехід до наступного пункту дій);
- візок нахилився і стоїть на борту (потрібна корекція візка).

3) Управління корекцією візка (відновлення вертикального положення.

Алгоритм визначення положення візка на його колесах:

- колеса зверху – візок перекинутий;
- колеса збоку – візок лежить на борту;
- на правому чи лівому борту;
- на задньому борту.

4) Відповідно до цих 4-х можливих положень, які повинні робот розпізнати своєю сенсорною системою (включаючи пристрої технічного зору), може бути застосована схема типу штрих-коду – наклейки коду зроблені на бортах транспортного візка, а робот має зчитуючий пристрій, що створює просту систему ідентифікації для цієї задачі розпізнавання.

Застосування відповідної програми з бібліотеки робота дозволяє перекинути і поставити візок на колеса (як попередню дію робота до початку послідовності його дій щодо завантаження візка вантажем, що випав).

Алгоритм такої програми можна визначити як послідовність наступних дій робота:

- а) підійти до візка з боку тяг;
- б) нахилити корпус робота;
- в) простягнути один з маніпуляторів в напрямку тяги до моменту торкання тяги кістю, про що надійде сигнал до СУ маніпулятора;
- г) вхопити тягу і зажати до заданого зусилля;
- д) повторити дії п. "в" та "г" для другого маніпулятора;

е) маніпулятор, який вхопив верхню тягу, тягне її в бік по часовій стрільці;

ж) маніпулятор, який вхопив нижню тягу, тягне її в протилежний бік, не випускаючи, поки візок не стане на колеса.

У випадку неможливості виконати п. "д" робот повинен припинити виконання цієї дії і перейти до іншого алгоритму:

- а) обійти візок і зупинитися біля заднього борту;
- б) нащупати кістю маніпулятора задній борт і його торець;
- в) схопитися за торець;
- г) повторити ці дії для другого маніпулятора;
- д) виконати пункт «е» та «ж» з попереднього алгоритму;
- е) перейти до виконання алгоритму завантаження візка.

5) Попередні операції АРТЗ щодо вантажу:

- вимірювання координат вантажу та відстані вантажу від транспортного візка та робота;
- від'єднання робота від візка і його відхід від тяг;
- розрахунок траєкторії підходу до вантажу;
- розрахунок управління рухом робота для наближення до вантажу;
- реалізація управління та наближення до вантажу;
- огляд вантажу для визначення можливих зон захвату маніпуляторами з варіантами:
 - зони знайдено на верхній поверхні вантажу – відсутні перешкоди для захоплення вантажу маніпуляторами;
 - знайдено одну зону, а для іншої треба повернути (перекинути) вантаж;
 - не знайдено на верхній частині вантажу потрібних зон і треба перевернути (чи повернути) вантаж на кут 90° (180°) по осі X_v (можливо – перекотити вантаж по землі);

– вибір остаточний зон захвату, при умові їх кількості >2 на основі відповідного критерію та характеристик зон, які можна визначити дистанційно з використанням системи технічного зору робота;

– якщо матриця дає відповідь на питання – які алгоритми треба застосувати для задачі, а шаблони – визначають послідовність їх виконання для досягнення мети завдання. Тому можна визначити, що це рівень шаблонів управління.

6) Управління захватом вантажу (див. п. а-3).

7) Перенесення вантажу та його завантаження (п.а-5).

8) Приєднання свого корпусу до тяг виконується в такій послідовності:

- підійти з боку тяг і зупинитися до них передом корпусу;
- нахилити корпус;
- простягнути маніпулятори в напрямку тяг;
- захопити лівим маніпулятором праву тягу 1;
- захопити тягу 2 правим маніпулятором;
- підняти обидві тяги і приєднати до пристрою на своєму корпусі (можливо розвернути поворотну частину корпусу на 180°).

9) Повернення АРТЗ (з візком) на траєкторію руху та відновлення руху до заданої кінцевої точки маршруту.

Після завершення відповідної послідовності дій АРТЗ формує повідомлення, яке пересилає в пункт контролю та моніторингу.

3.2. Розробка архітектури взаємодії підсистем АРТЗ з навколишнім середовищем і засобами комп'ютерного дистанційного управління

3.2.1. Проблеми реалізації систем зв'язку з АРТЗ

Основними проблемами на шляху створення систем зв'язку дальньої дії для моніторингу АРТЗ на шляху перевезення вантажу є:

- забезпечення радіовидимості між АРТЗ і наземним

- комплексом моніторингу;
- компенсація великого загасання сигналу на маршруті.

Пряме бачення між АРТЗ і пунктом моніторингу може бути досягнуто за рахунок збільшення висоти підйому наземної антени. Передача інформації з високою швидкістю на відстані більше 30 км можлива з використанням ретрансляційного обладнання, супутникових систем зв'язку, стаціонарних систем передачі інформації.

Для компенсації великого загасання сигналу на трасі можуть бути зроблені наступні заходи:

- збільшення вихідної потужності передавача;
- використання літальних апаратів типу БПЛА у якості проміжної ланки для ретрансляції;
- збільшення коефіцієнтів посилення антенного обладнання.

Найбільш поширена на сьогоднішній день технологія передачі інформації полягає в безперервній трансляції зображення під час його отримання в цифровому або аналоговому форматі, структура якого не змінюється протягом усього маршруту. Необхідно врахувати, що безперервна трансляція зображень має такі особливості:

- значна частина об'єктів візуальної інформації може не мати потрібних ознак;
- відсутня гарантія достовірної доставки інформації;
- потрібне постійне випромінювання сигналу передавачем, що дозволяє легко виявити робота і встановити його координати.

Існуюча технологія доставки зображення не ефективно використовує ресурси радіоканалу. У зв'язку з цим стає актуальним вирішення наступних завдань:

- реалізація функції гарантованої доставки (особливо для зображень високої роздільної здатності);

- реалізація адаптивного зниження роздільної здатності відеопотоку в залежності від актуального бюджету каналу зв'язку;
- реалізація можливості отримання минулого знімка в повній роздільній здатності з метою уточнення деталей зображення в кадрі;
- створення адаптивної системи передачі інформації, здатної ефективно використовувати енергетичний і спектральний ресурс каналу зв'язку.

На борту АРТЗ розміщують не менше двох систем зв'язку: дуплексна / напівдуплексна апаратура передачі командно-телеметричної інформації та симплексна система передачі інформації корисного навантаження. Апаратура передачі командно-телеметричної інформації призначена для низькошвидкісної передачі командної інформації з центру моніторингу на борт АРТЗ і малої передачі телеметричної інформації у зворотньому напрямку. Апаратура передачі інформації корисного навантаження призначена для односторонньої високошвидкісної передачі інформації корисного навантаження від АРТЗ. В процесі роботи системи зв'язку оцінюються ймовірності бітової помилки для кожного каналу зв'язку і приймається рішення про розподіл командно-телеметричного потоку даних між каналами. Використання декількох каналів зв'язку підвищує надійність системи передачі даних і в той же час є надлишковим з точки зору ефективного використання радіочастотного спектру. Одним із способів підвищення ефективності комплексування системи зв'язку є адаптивна робота системи, яка має на увазі передачу по командно-телеметричних каналах зв'язку частини даних корисного навантаження, обсяг яких варіюється в залежності від поточних умов передачі радіосигналу.

Максимальна відстань для прямого радіозв'язку між АРТЗ цивільного призначення та центром моніторингу на сьогоднішній день залежить від складності рельєфу та будівель і становить не більше декількох кілометрів. Для командно-телеметричної зв'язку на великих відстанях можливе

використання супутникового зв'язку. У цьому випадку потік даних обмежується мінімально необхідною інформацією про стан робота, інтервал передачі якої може становити, наприклад, від 30 до 300 секунд.

Перспективним напрямком у розвитку систем зв'язку з АРТЗ є використання технологій сотового зв'язку типу CDMA, особливістю якої є застосування доступу з кодовим розподілом каналів, стійкістю до перешкод, високим ступенем захищеності переданих даних від несанкціонованого доступу і кращими енерго-економічними показниками, можливість отримання значної зони радіопокриття від однієї базової станції (радіус до 50 км). Підвищена екологічна безпека абонентських терміналів CDMA, що працюють з потужністю 0,25 Вт (а не 2Вт як GSM). Абонентський термінал CDMA є багатофункціональним пристроєм, який дозволяє передавати дані між комп'ютерами, цифрові і аналогові факси, а також забезпечувати прямий доступ в Інтернет. При цьому стає можливою передача великого обсягу даних корисного навантаження в режимі реального часу (наприклад, це можуть бути зображення з датчиків випромінювання різного діапазону довжин хвиль). Факторами, які різко обмежують радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні даних діапазонів, є сильна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від умов пересічної місцевості, наявність покриття радіозв'язку на маршруті АРТЗ.

Залежність максимальної дальності зв'язку від висоти підйому антени CDMN слабка, тому висота щогли для установки наземної антени визначається необхідністю зниження впливу багатопроміневості, з урахуванням можливих перешкод на шляху поширення сигналу (рельєф місцевості, будови).

3.2.2. Можливі варіанти реалізації зв'язку АРТЗ – комп'ютерний стенд

Для передачі з борту БПЛА даних та відео може використовуватись цифровий C-OFDM канал захищений шифруванням сигналів в режимі on-line

на відстань до 15 км. (Цифровий відео канал можна створити направленими антенами, які створюють пучок шириною 20° . Антени з фазованою решіткою надають можливість для широкосмугового зв'язку). Тому є потреба для зв'язку стенду з роботом використовувати БПЛА для ретрансляції відео сигналу на землю таку технологію. В [4] показано, що втрати на відстані (30-50 км) можуть складати $>130\text{дБ.}$, а компенсувати ці втрати можна на базі антенних решіток в горизонтальній площині [3]. Вузька діаграма спрямованості в горизонтальній площині дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення при постійній ширині діаграми у вертикальній площині, що гарантує можливість наведення антени при будь яких кутах розташування АРТЗ, без врахування рельєфу місцевості його переміщення.

3.3. Модель взаємодії виконавчих органів з сенсорною системою АРТЗ через взаємовплив навколишнього середовища

3.3.1. Загальна модель взаємодії АРТЗ з його сенсорикою через середовище

АРТЗ має дві групи сенсорів для контролю параметрів внутрішнього і зовнішнього середовища. Внутрішнє середовище складається з багатьох компонентів, які є підсистемами та виконавчими пристроями робота та транспортного візка (для загального варіанту компоновки транспортного засобу). Вони реалізують системи і підсистеми, блоки і виконавчі пристрої АРТЗ, які визначають його функціональність та призначення. Зовнішнє середовище – це середовище переміщення роботом вантажів, яке частково визначено заздалегідь, а його об'єкти, серед яких є і перешкоди, які робот, перебуваючи на маршруті, повинен обминати. Але є перешкоди на маршруті, які неможливо передбачити і врахувати заздалегідь на електронній карті, яка завантажується в робота перед початком виконання завдання. Це більшою часткою динамічні об'єкти, які рухаються і можуть перетинати маршрут АРТЗ, що може призвести до їх зіткнення, пошкодження, падіння чи

перевертання та випадіння вантажу, що вкрай небажано чи призводить до аварійної ситуації.

Для обох груп сенсорів система обробки сигналів виконує відповідні первинну та вторинну обробки, а результати цього використовуються системами управління для корекції траєкторії руху АРТЗ чи зміни динаміки руху.

На роботу та транспортний візок впливають зовнішні збурення у вигляді нерівностей і стану поверхні, де переміщується АРТЗ, погодні умови (дощ, туман, інше), що визначає відхилення руху робота від заданого маршруту, необхідність корекції траєкторії переміщення. Ці збурення повинні бути компенсовані системою управління та виконавчими органами робота, для чого використовується навігаційна система, яка складається з гіроскопу, акселерометра, магнітометра, а також дані лазерних далекомірів та систем ультразвукового зондування передніх сфер АРТЗ на дальній зоні та ближніх зонах моніторингу. На рис.3.1 надана структура загальної моделі взаємодії АРТЗ з сенсорикою через зовнішнє середовище.

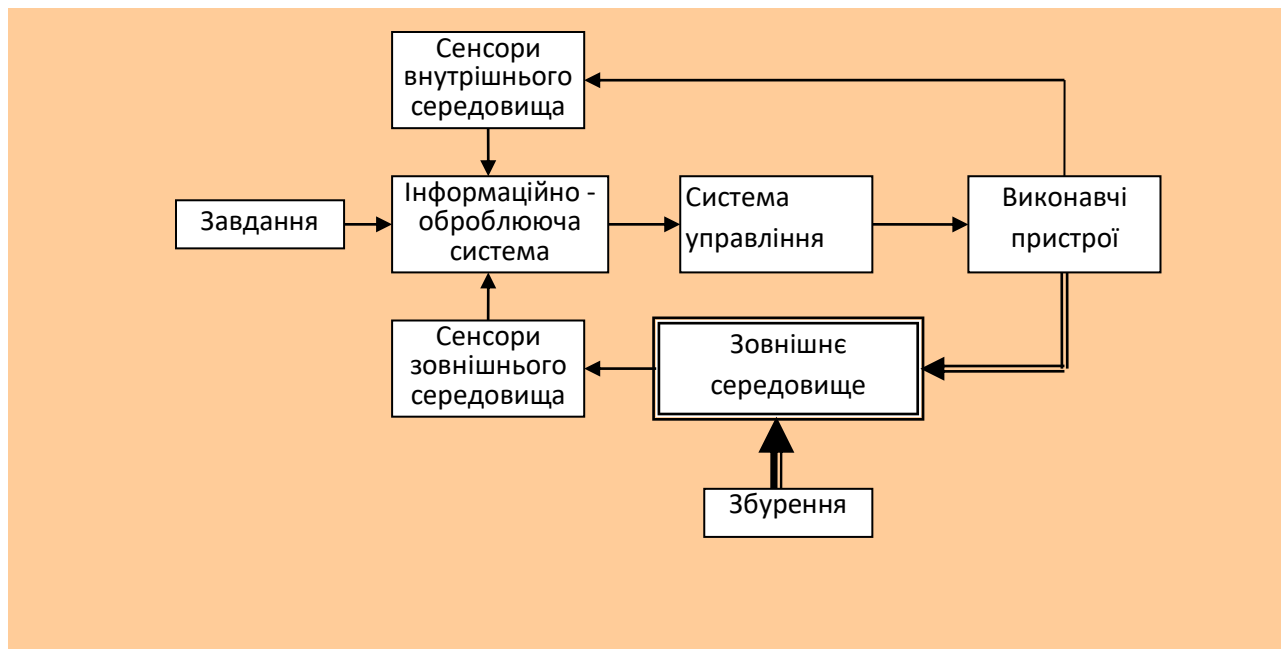


Рисунок 3.1. Загальна модель взаємодії виконавчих органів АРТЗ з його сенсорикою через взаємовплив навколишнього середовища

3.3.2. Модель взаємодії актуаторів і сенсорів АРТЗ через зовнішнє середовище

Для створення комп'ютерної моделі взаємодії сенсорів і актуаторів АРТЗ з врахуванням зовнішнього середовища може бути використані пристрій комп'ютерного керування, який складається з комп'ютера стенду, двох контролерів – контролера руху та контролера зворотнього зв'язку, а також програм термінального керування.

Контролер руху подає через канали зв'язку сигнали управління на роботизований пристрій де оброблюється мінікомп'ютером АРТЗ після чого команди управління передаються в контролер координації руху та інтегрованого управління, а далі розподіляються по контролерах нижнього рівня, що керують кінцівками, маніпуляторами, корпусом робота і транспортним візком.

Сигнали управління з контролерів нижнього рівня поступають на відповідні двигуни, які здійснюють механічних рух в зовнішньому середовищі у вигляді переміщення АРТЗ по поверхні, переміщення вантажу, обминання перешкод на маршруті робота. При цьому, характеристики самого середовища впливають на параметри роботизованого пристрою – так навантаження робота впливає на його стійкість, яка потребує стабілізуючого управління, а вантаж змінює кутові положення ланок маніпуляторів, погодні умови змінюють характеристики поверхні, що може визивати проковзування стоп робота та коліс візка, що теж призводить до додаткового управління.

Відповідні датчики кінцівок, маніпуляторів, корпусу робота і сенсори візка формують сигнали для контролера обробки їх, виділяючи вектор параметрів для координації руху, який поступає в контролер координації та інтегрованого управління, і формує вектор критичних параметрів, що передається в контролер зворотнього зв'язку.

Таким чином здійснюється управління компонентами АРТЗ в контурі із зворотнім зв'язком, що стабілізує рух самого робота та координує взаємодію

руху його кінцівок із рухом транспортного візка, а також забезпечує взаємодію маніпуляторів при завантаженні чи розвантаженні візка з рухом корпусу.

Висновки до розділу

В даному розділі був проаналізований базовий функціонал для усіх типів РТЗ, та на основі цього був визначений необхідний функціонал для антропоморфних РТЗ, що розглядаються у даній роботі. Також була розроблена архітектура взаємодії підсистем АРТЗ з навколишнім середовищем і засобами комп'ютерного дистанційного управління

РОЗДІЛ 4: МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ СТАРТАП – ПРОЕКТУ

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів. Узагальнено етапи розроблення стартап-проекту можна подати таким чином:

А. Маркетинговий аналіз стартап-проекту.

В межах цього етапу:

- 1) розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- 2) аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- 3) на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

А. Організація стартап-проекту.

В межах цього етапу:

- 4) складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- 5) розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- 6) визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формується потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- 7) розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

С. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту.

В межах цього етапу:

- 1) визначається обсяг інвестиційних витрат;
- 2) розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються

показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);

3) визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

D. Заходи з комерціалізації проекту

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

1. визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
2. складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
3. планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
4. планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту. Проте фахівці зі створення та розвитку стартап проектів окремо відзначають, що відсутність маркетингових знань та умінь, що уможливають розробку ринково затребуваного проекту із вихідної ідеї, є основною причиною високого рівня банкрутств стартап компаній, і ця проблема може бути вирішена за рахунок навчання винахідників. Відповідно, основним призначенням даних Методичних рекомендацій є надання студентам знань щодо суті, основних принципів розроблення стратегії ринкового впровадження та маркетингового управління інноваційними у промислових галузях економіки, використання ефективних маркетингових інструментів просування високотехнологічних продуктів виробництва та послуг.

4.1. Опис ідеї проекту

В межах підпункту слід послідовно проаналізувати та подати у вигляді таблиць:

- 4) зміст ідеї (що пропонується);
- 5) можливі напрямки застосування;
- 6) основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- 7) чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Зміст ідеї. Пропонується розробити методи управління рухом антропоморфного роботизованого транспортного засобу на довільній опорній поверхні.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів.

1. Конкуренти в Україні відсутні через практичну недостатність фахівців в галузі Антропоморфної робототехніки, слабка технічна забезпеченість, відсутність розуміння необхідності створення таких систем.

2. Потенційні конкуренти практично відсутні через відсутність кваліфікованих фахівців та бажанням заробляти великі та “швидкі” гроші.

3. Розробка, виготовлення матеріалів та закупівля необхідного обладнання коштує великих грошей.

4. Товарів замінників нема. Закордонні аналоги коштують занадто дорого, що робить їх економічно невигідними в Україні.

5. Споживачі – заводи, склади, фабрики, атомні електростанції.

Таблиця 4.1.

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди
Використання антропоморфного роботизованого транспортного засобу для переміщення, транспортування вантажу та дотримання стійкості на довільній опорній поверхні за допомогою методу управління АКА на довільній ОП	Дотримання усталеного положення АКА	Можна дотримуватися балансу та не перехилятися
	Переміщення по довільній поверхні	Переміщення АРТЗ не лише по заданій ОП, а й по довільній

Таблиця 4.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабк а сторона)	N (нейтраль на сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Boston Dynamics			
1.	Можливість переміщення будь-якою ОП	У процесі розробки	У процесі розробки		+	+
2.	Собівартість	Висока	Дуже висока			+
3.	Зручність управління	Зручне	Інтуїтивно не зрозуміле		+	
4	Точність	Висока	Висока			+

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару). Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

1. за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
2. чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
3. чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Використання штучного інтелекту для обробки навколишнього середовища	Використання нечіткого логічного висновку	наявна	доступна
	Використання нечітких нейронних мереж	Необхідно доробити	доступна
	Використання гібридних нейронних мереж	Необхідно доробити	доступна

Ідея проекту – створити модель управління АРТЗ, що дозволить йому переміщуватися довільною ОП. Технологія 1. Використання п'ятиланкової структури. Дана технологія наявна. Авторам проекту вона доступна. Обрана технологія реалізації ідеї проекту – технологія 1.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть

перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Біля 3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100 млн.дол. США
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Дозвіл Міністерства охорони здоров'я
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність національним стандартам
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	R = 33%

На основі аналізу даних, наведених у таблиці можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Високоефективна оцінка місцевості та робота у них	Шахтарські корпорації, геологічні фірми, геологічні інститути	стандарти	Висока якість товару

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 6–7).

Таблиця 4.6.
Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вартість обладнання	Підвищення ціни	Зміна постачальників
2	Висококваліфікований обслуговуючий персонал	Відсутність	Організація підготовки висококваліфікованого обслуговуючого персоналу

Таблиця 4.7.
Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Об'єм продажу	Ріст попиту	Поставки додаткової кількості систем
2.	Функціонал діагностичної системи	Розширення можливостей системи	Реалізація розширення можливостей системи

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8)

Таблиця 4.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	Домінує невелика кількість продавців, а вхід в галузь нових фірм обмежений високими бар'єрами.	Покращити рекламу
2. За рівнем конкурентної боротьби - національна	Між компаніями всередині країни	Розширити функціонал дії діагностичної системи
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Між компаніями всередині країни	Знизити вартість програмного забезпечення
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращити якість діагностування
5. За характером конкурентних переваг - цінова і нецінова	Ведуться цінові війни, а також в нецінові форматі, за рахунок кількості і якості послуг, що надаються	Покращити якість діагностування
6. За інтенсивністю - не марочна	Використовуються прийоми, що ставлять учасників ринку в нерівне становище	Знайти підтримку у Міністерстві охорони здоров'я

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 9).

Таблиця 4.9.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товар
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки:	Визначити Інтенсивність Конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів	- чи є можливості входу в ринок? - чи є потенційні конкуренти? Строки виходу їх на ринок?	Чи постачальники диктують умови роботи на ринку? Які?	Чи клієнти диктують умови роботи на ринку? Які?	Обмеження для роботи на ринку через товари замінники

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також було зроблено висновок щодо характеристик, які повинен мати проект, щоб бути конкурентноспроможним на ринку.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. № 4.6–4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 4.10.

Робиться висновок щодо характеристик (сильних сторін), які повинен мати проект, щоб бути конкурентноспроможним на ринку.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 4.10.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Алгоритмічне забезпечення	Використовується штучний інтелект
2	Програмне забезпечення	Використовуються сучасні пакети з штучними нейронними мережами

Таблиця 4.11.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Робототехнічна підсистема планування траєкторії»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Час складання	18				+			
2	Можливість аналізу результатів	15			+				
3	Комплексний підхід	10					+		
4	Надійність	15					+		
5	Простота реалізації	10			+				
6	Якість	17		+				+	
7	Технічне обслуговування	15						+	

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12.
SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Зменшення часу визначення діагнозу; 2. Зменшення фінансових затрат на дослідження; 3. Краща надійність; 4. Краща якість продукції; 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Складність у визначенні алгоритму; 2. Затрати на обладнання; 3. Унікальне ПЗ для обробки результатів;
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Закріпитись на ринку товарів та послуг; 2. Конкурентоспроможність; 3. Іноземні інвестиції; 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Неможливість малих підприємств дозволити використання новітньої техніки;

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Залучення нових споживачів — рекламувати товар в профільних установах для створення стійкого попиту та заохочення.	Ймовірність висока, оскільки якщо дана альтернатива виявиться новітньою розробкою, споживачі запитуватимуть продукт у посередників, а ті в свою чергу у виробника.	1 рік
2	Використовувати застарілий метод для роботи, адже більшість клієнтів на ринку не в змозі дозволити оновити виробництво	Ймовірність мала, оскільки існує альтернативна конкуренція на ринку.	6 місяців
3	Робота з сучасними представниками на ринку, в яких використання новітніх технологій витісняє застаріле.	Ймовірність висока, оскільки даний проект має велику кількість переваг.	5 місяців

Після аналізу зазначити обрану альтернативу. З означених альтернатив обирається та, для якої:

- а) отримання ресурсів є більш простим та ймовірним;
- б) строки реалізації – більш стислими.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14.

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Шахти	Готові	60%	Висока	Без обмежень
2	Компанії	Готові	15	Середня інтенсивність	Без обмежень
3	Склади	Готові	10	Низька інтенсивність	Без обмежень
4	Інститути	Готові, при наявності потреби	5	Низька інтенсивність	Без обмежень
5	Геологічні спілки	Готові, при наявності потреби	10%	Низька інтенсивність	Без обмежень
Які цільові групи обрано: шахти, компанії, склади, інститути, геологічні спілки.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) автори ідеї обирають цільові групи, для яких вони пропонуватимуть свій товар, та визначають стратегію охоплення ринку:

1. якщо компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу;
2. якщо працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу – вона використовує стратегію диференційованого маркетингу;
3. якщо компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги) – вона використовує масовий маркетинг.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15.

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Встановлення низької ціни на новий товар для залучення більшої кількості покупців і завоювання великої долі ринку.	Стратегія диференційованого маркетингу	Комплексний підхід; доступність; простота реалізації; Мобільність; низькі затрати.	Стратегія диференціації

Висновки: обрана стратегія розвитку спеціалізація через існування на ринку більш сильніших гравців. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації та зайняти певну стабільну нішу на ринку.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.4.16).

Висновки: оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідеру.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.16.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
2	Ні	Забирати існуючих у конкурентів.	Ні. Суть товару збільшити точність встановлення діагнозу, та зменшити час на його встановлення	Стратегія виклику лідера.

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Забезпечує високу точність діагностики; знижує витрати; більша надійність	Стратегія диференціації	Комплексний підхід; Точність; Економічність;	За показниками якості; За сферою застосування; За різновидом товару.

Висновки: На ряду із використання інноваційних методів підвищення точності, проект повинен викликати асоціації у клієнта у гнучкості налаштування та діагностики, можливості після продажно́ї підтримки та високої якості виготовлення.

4.5. Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність	Забезпечує високу точність діагностики.	Точність забезпечується використанням інноваційної технології.
2	Економічність	зменшуються витрати на встановлення діагнозу	Зменшується час на постановку діагнозу

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Висновки: основними засобами захисту від копіювання є патентування програмних та апаратних рішень, що використовуються у приладі. Окрім того, захист програмного коду повинен запобігти копіювання програми.

Таблиця 4.19.
Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Економічні	Нм	Вр
	2. Технічні	М	Тх
	3. Надійності	М	Тл
	4. Технологічні	М	Тх
	Якість: патент на корисну модель,		
	Пакування		
	Марка: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» Медична діагностична система		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: можливість аналізу та удосконалення системи.		
	Після продажу можливість створення нового ПЗ та модифікація існуючого		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист ПЗ			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити

– чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 20).

Таблиця 4.20.

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	80000 \$	120000 \$.	10-15 0000000 \$.	100000/1500 00\$.

Висновки: обрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна відлякує споживача.

Таблиця 4.21.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну кількості	Постачальник виконує такі основні функції: транспортування, складування, зберігання, доробка, просування до оптових і роздрібних торгових ланкам.	0 (без посередників)	Власна система збуту

Висновки: основними каналами збуту є підписка та продаж. Через відносно не велику цільову аудиторію немає сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збуту та власна системи збуту.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції

маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 22).

Таблиця 4.22.

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтація на регулярні поставки	Формальні/неформальні канали комунікацій	Комплексний підхід; Доступність; Мобільність;	Інформування споживачів; Стимулювання продажу; Пошук вигідних партнерів;	Даний продукт є інноваційним та унікальним

Висновки до розділу

Першим кроком було відбір та висвітлення самої ідеї проекту. Для цього приведено назву проекту та можливі зацікавлені сторони, котрі будуть потенційними споживачами продукту та які саме ризики можуть бути під час реалізації. Аналіз слабких та сильних сторін дають можливість автору проекту визначити аспекти, на яких слід зробити ставку. Перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик ідеї дає можливість до уявлення конкурентноспроможності запропонованого рішення. Наступним кроком проводився технологічний аудит проекту. Під час аудиту автор отримує можливість до розуміння кращої технології виконання. Виявлено що більшість технологій вже існує, однак використання останніх не дасть можливості мати переваги над конкурентами. Зважаючи на стрімкий розвиток технологій, для швидкого отримання ресурсів та прибутків, слід

обрати кооперацію, як форму ринкового впровадження проекту. Тобто, для того щоб встигнути за ринком, слід не розроблювати систему з нуля, оскільки це займе доволі багато часу, а запропонувати лідерам ринку використання запропонованих програмних рішень. Звісно, це є альтернативою, оскільки в такому випадку ні одна зі сторін не отримає повного прибутку. Після аналізу всіх аспектів ринку, подальша імплементація проекту можлива. Але є одна важлива умова. Слід провести доволі сильну рекламну компанію, та донести до споживачів необхідність використання системи саме з підвищеною завадостійкістю та чому саме обрати нашу систему.

ВИСНОВКИ

В даній роботі розглянуті базові підходи до моделювання кінематичних зв'язків і динаміки антропоморфних крокуючих апаратів. Виконано аналіз моделей кінематики та динаміки АРТЗ. Проведено дослідження сучасних методів управління рухом АРТЗ.

Розроблено кінематичну структуру та модель АРТЗ для пересування по довільній поверхні, головним завданням яких є збереження рівноваги роботизованого засобу в умовах невизначеної опорної поверхні. Проведено оцінку впливу зовнішнього середовища на характеристики АРТЗ та його архітектуру. Визначений функціонал та архітектура антропоморфного роботизованого транспортного засобу з урахуванням дії на нього зовнішнього середовища.

Розроблено стартап-проект.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бармак О. В., Ю. В. Крак, Г. М. Єфімов. "Інформаційна технологія розпізнавання емоційної міміки на обличчі людини." (2008).
2. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: Модельные задачи динамики и управления. – Москва : Наука. – 1994. – 286 с.
3. Белецкий В. В. Регулярные и хаотические движения корпуса двуногого ходящего аппарата: препр./ АН СССР. Ин-т прикл. математики им. М. В. Келдыша. – Москва, 1990. – №52.– 30 с.
4. Белецкий В. В., Бербюк В. Е., Самсонов В. А. Параметрическая оптимизация движений двуногого шагающего аппарата // Изв. АН СССР, МТТ. – 1982. – №1. – С. 28–40.
5. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. – Москва : Наука, 1984. – 228с.
6. Бербюк В. Є., Красюк Г. В., Ніщенко Н. І. Математичне моделювання динаміки ходи людини у сагітальній площині // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 1997. – Т. 40, №4. – С. 127–138.
7. Бербюк В. Є., Ніщенко Н. І. Математичне проектування енергетично-оптимальних протезів стегна // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 1998.– Т. 41, №3.– С. 110–117.
8. Бернштейн Н. А. О построении движений. – Москва, 1967.
9. Богданов В. А. Элементы биомеханики тела человека // Физиология движений. – Л.: Наука, 1976.– С. 5–37.
10. Болотин Ю. В., Новожилов И. В. Управление походкой двуногого шагающего аппарата // Изв. АН СССР. МТТ. – 1977. – №3. – С. 47–52.
11. Бордюг Б. А., Ларин В. Б., Тимошенко А.Г. Задачи управления шагающими аппаратами. – Киев : Наукова думка, 1985.– 264 с.

12. Бордюг Б. А., Ларин В. Б. Моделирование движения электромеханического шагающего аппарата // Проблемы управления и информатики. – 1995. – № 4. – С. 115–119.
13. Брискин Е. С. О минимизации энергозатрат при движении шагающей машины с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, Я.В. Калинин // 2009.
14. Величенко В. В, Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники, 1988.
15. Витензон А. С. Динамические фазы цикла ходьбы // Биомеханика.– Рига, 1975. – С. 251–257.
16. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. – Москва : Мир, 1976. – 543 с.
17. Кириченко Н. Ф., Сопронюк Ф. А. Кинематические и динамические модели мехатронных систем // Проблемы управления и информатики. – Киев. 1995, №6. – С. 116–127.
18. Кисленко Ю. И. Тактильное ощущение шагающего робота / Техническая кибернетика, 1991. – № 6. – С. 62–50.
19. Ларин В. Б. Управління крокуючими апаратами. – Київ : Наукова думка, 1980. – 168с.
20. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата.– Москва : Наука, 1984.– 312 с.
21. Скопецкий В. В., Стоян В. А., Кривонос Ю. Г., Математичне моделювання прямих та обернених задач динаміки систем з розподіленими параметрами. – Київ : Наукова думка, 2002.– 361 с.
22. Ткач М. М. Математичне моделювання кінематичних зв'язків антропоморфного крокуючого апарата / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // 2014.
23. Ткач М. М. Математичний опис рівноваги двонової локомоції / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // Адаптивні системи автоматичного управління.

– 2012. №20. – С. 146–152. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asau_2012_20_22.

24. Ткач М. М. Моделювання руху антропоморфного крокуючого апарата на довільній твердій поверхні / М. М. Ткач, Д. О. Гуменний // , 2012.

25. Abba G. Robot dynamic modeling using a power flow approach with application to biped locomotion / G. Abba, N. Chaillet // Williams, 1999. – 660 p.

26. Aguiar A. P. Path-following for nonminimum phase systems removes performance limitations // IEEE Transaction and Automation vol.50 iss.2, 2005. – 234–239 p.

27. Aldebaran Robotics. Humanoid robotics & programmable robots [Електронний ресурс] . Режим доступу: <http://www.aldebaran.com/en>.

28. Benallegue M., Laumond J-P. and Berthoz A., Contribution of Actuated Head and Trunk to Passive Walkers Stabilization, 2010.

29. Chemori, Ahmed, et al. "A control architecture with stabilizer for 3D stable dynamic walking of SHERPA biped robot on compliant ground." Humanoids' 10: 10th International Conference on Humanoid Robots. IEEE-RAS, 2010.

30. Chow C. K., Jacobson D. H. Studies of human locomotion via optimal programming // Mathem. Biosciences. – 1971. – Vol. 10, №.3/4.– P. 239–306.

31. Frank L. Robot Manipulator Control. Theory and Practice / L. Frank, T. Abdallah, D. Dawson // USA, NY. : “Marcel Dekker Inc.”, 2006. – 614 p.

32. Fujimoto Y. Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force interaction / Y. Fujimoto and A. Kawamura // 1998.

33. Fukuda F., Michelini R., Potkonjak V., Tzafestas S., Valavanis K., Vocobratovic M. How far away is “Artificial Man” / IEEE Robotics & Automation Magazine. March 2001. P. 66–73.

34. Furusho J. and Sano A. Sensor-based control of a nine-link biped // Int. J. Robot. Res. 1990. Vol. 9, No 2. P. 83–98.

35. Hardt M., Kreutz-Delgado K., Helton J. W. Optimal biped walking with a complete dynamic model // Proc. 38th conference on decision and control, Phoenix AZ, USA, December 7–10 (IEEE 1999). – 1999. – P. 2999–3004.
36. Hardt M., von Stryk O. Dynamic modeling in the simulation, optimization, and control of bipedal and quadrupedal robots // ZAMM. Z. angew. Math. Mech. 2003. – Vol. 84, – No. 10. – P. 1–16.
37. Humennyi D. Planning Algorithm of Quasi-Static Locomotion for Humanoid Robot Walking on Rough Terrain / Israel Conference on Mechanical Enguneering, Israel, Tel Aviv, 2015. – P. 17–28.
38. Humennyi D. Return from Falling and Stabilization of Antropomorphiv Walking Robot nearby Stability Boundary / D. Humennyi, A. Chkalov //, 2015.
39. Huy, T. D., Cuong, N. C., & Phuong, N. T. (2013). Control of biped robot with stable walking. Hip, 3(y3), z3.
40. Larin V. B. Control of walking machines // J. Biomechanics. – 1990. – Vol. 22, №1. – P. 3–7.
41. McGeer T. Passive dynamic walking // Int. J. Robort Res.–1990.–Vol. 9.– P. 62–82.
42. McGeer T. Passive walking with knees' // Proc. of IEEE conf. on Robotics & Automation.–Cincinnati.–1990.– P. 1640–1645.
43. Hill, J., & Fahimi, F. (2015). Active disturbance rejection for walking bipedal robots using the acceleration of the upper limbs. Robotica, 33(02), 264–281.
44. Muybridge, Eadweard. Animal locomotion. New York: Da Capo Press, 1969.
45. McGhee, R.B. and Iswandhi, G.I., 1979. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 9(4), pp.176-182.

46. Nishiwaki K., Kagami S., Kuniyoshi Y., Inaba M., Inoue H. Toe joints that enhance bipedal and fullbody motion of humanoid robots // Proc. of 2002 IEEE int. conf. on Robotics & Automation. 2002. P. 3105–3110.
47. Van Oort, G., Carloni, R., Borgerink, D. J., & Stramigioli, S. (2011, May). An energy efficient knee locking mechanism for a dynamically walking robot. In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on (pp. 2003-2008). IEEE.
48. Ott C. Prioritized Multi-Task Compliance Control of Redundant Manipulators / Christian Ott, Alexander Dietrich, and Alin Albu-Schäffer // Elsevire, Automatica, vol. 53, 2015. – P. 416–423.
49. Ott, C., Roa, M. A., Albu-Schäffer, A., & Hirzinger, G. (2011, September). Bipedal walking control based on capture point dynamics. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 4420-4427). IEEE.
50. Camacho E., Bordons, C., Model Predictive Control, Springer-Verlag, 2004, 405p.

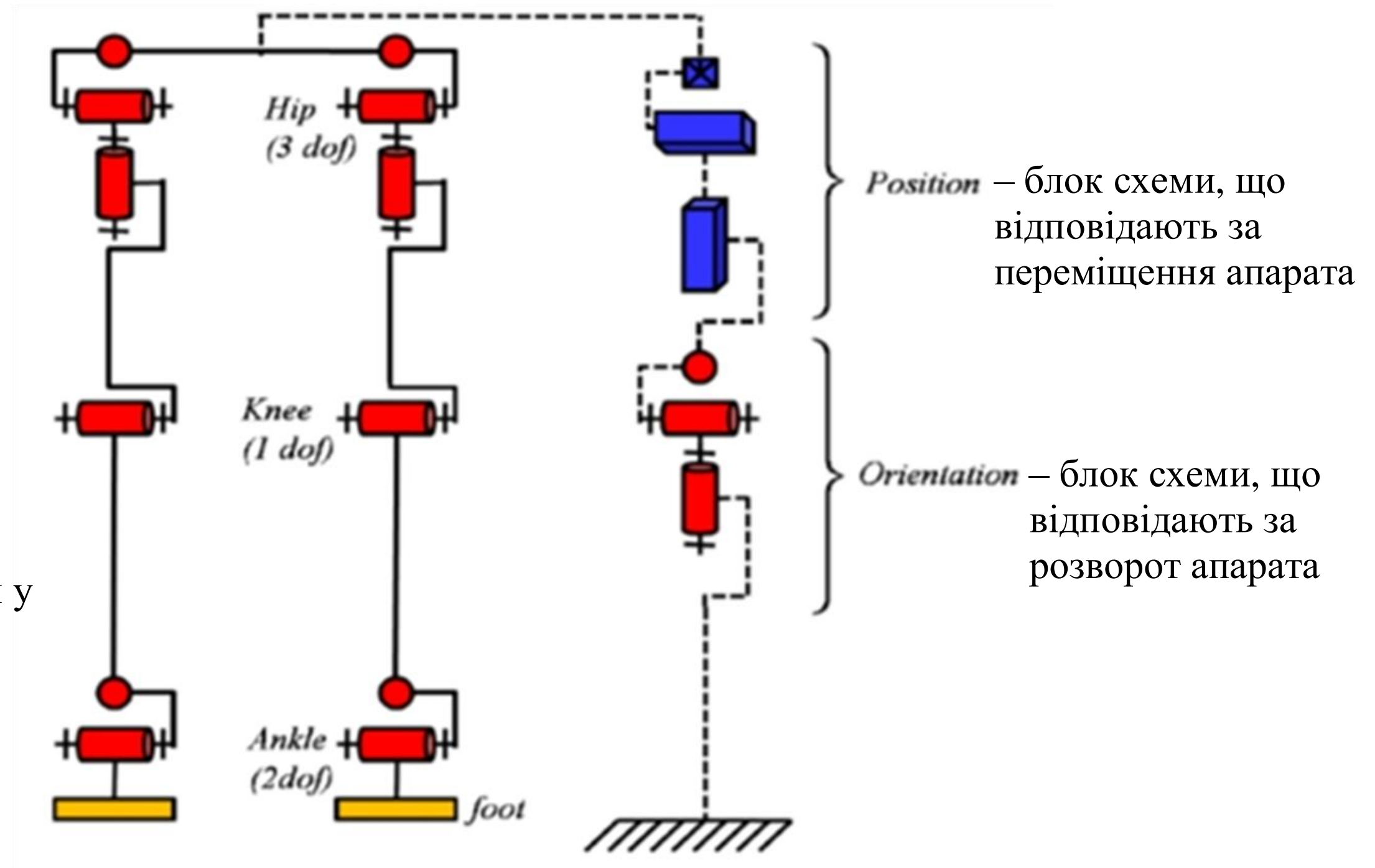
ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
ІЛЮСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Кінематична схема тривимірного АКА з 18 ступенями свободи

Hip,
Knee,
Ankle –
шарніри апарата

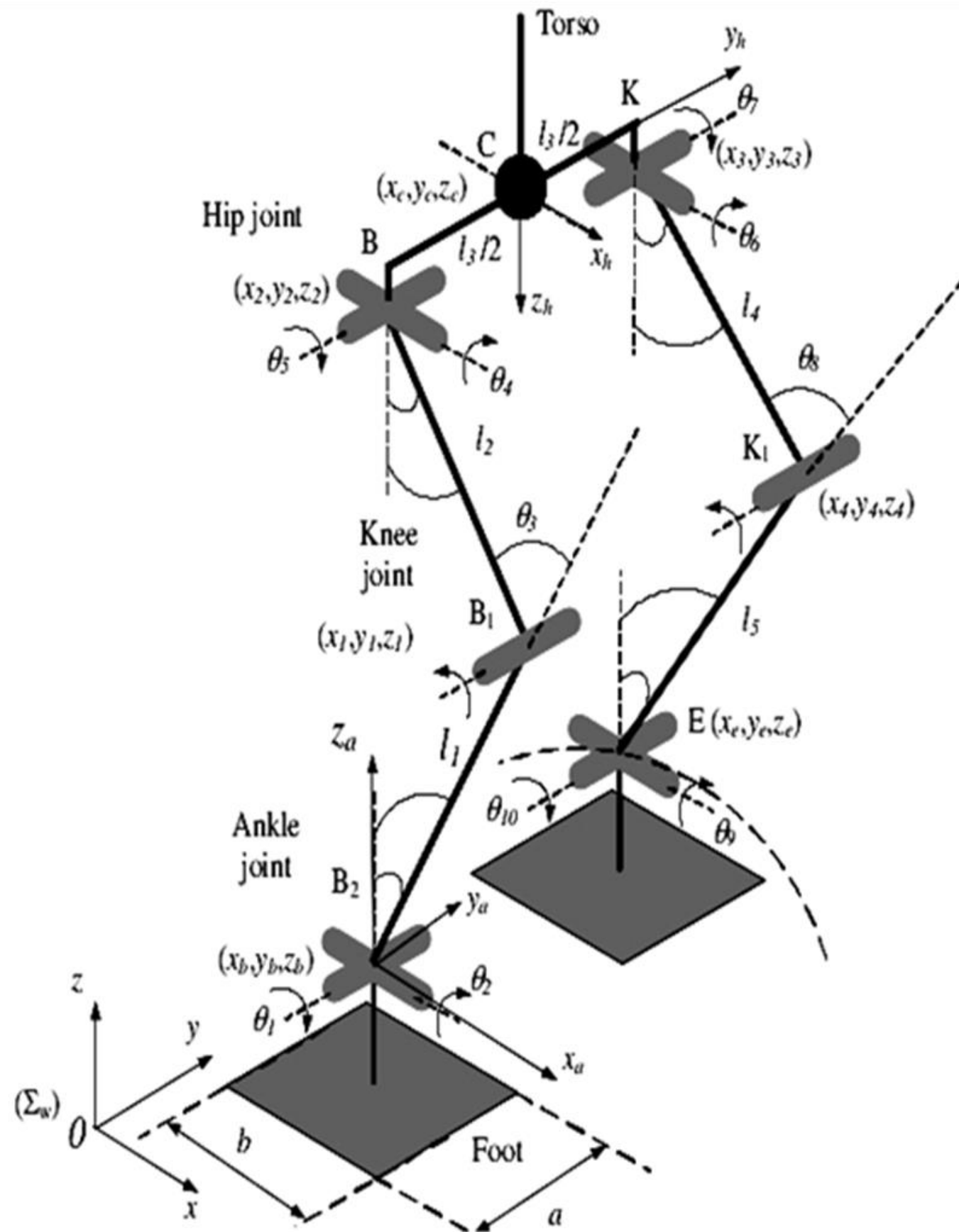
dof – кількість
ступенів свободи у
шарнірі



Демонстраційний плакат №1
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих
транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.
Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

Кінематична модель АКА з 10 ступенями свободи



x, y, z – базова система координат апарата;

a – ширина стопи;

b – довжина стопи;

B, B_1, K, K_1, E – сполучення АКА;

θ – кути кінематичних пар ланок;

C – положення ТЦМ;

Hip, Knee та Ankle joint – блоки сполучень апарата;

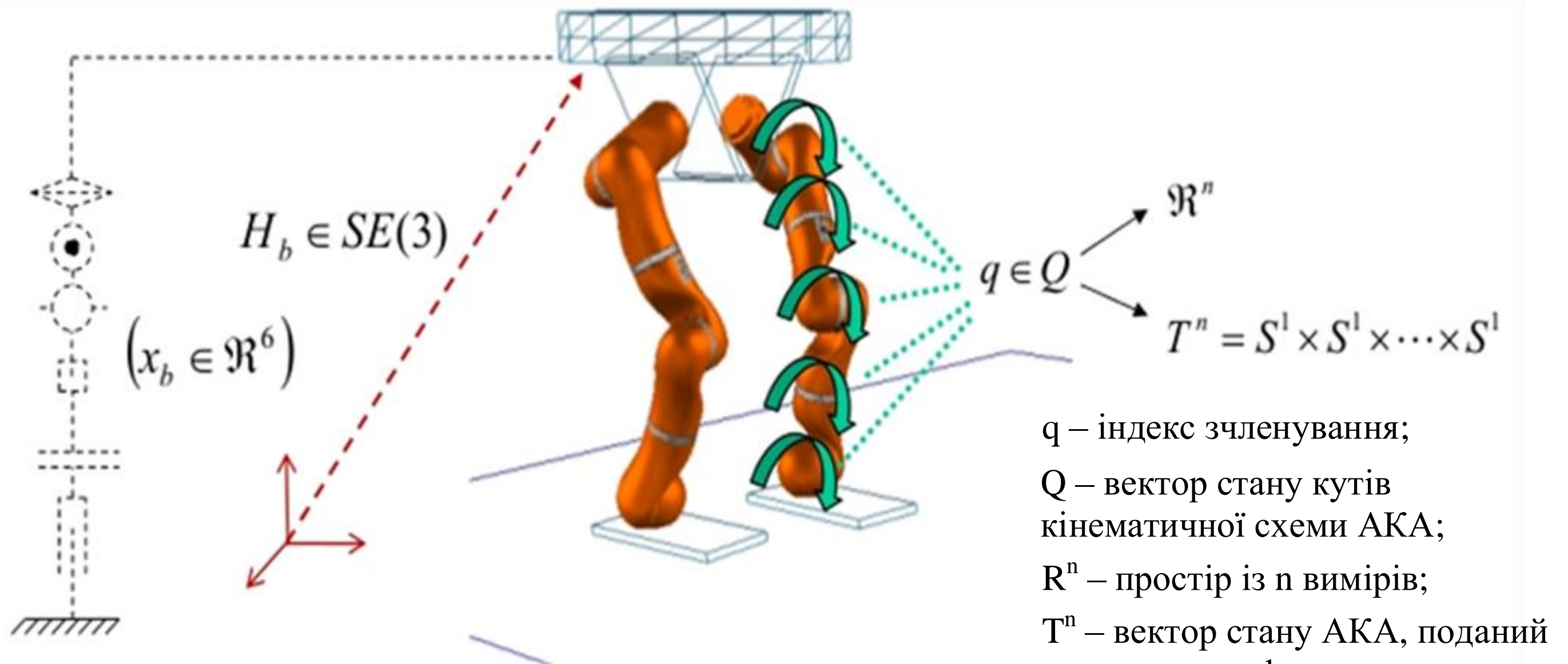
Torso – ланка корпусу (включає в себе голову, руки, шию тощо).

Демонстраційний плакат №2
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих
транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.

Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

Комп'ютерна візуалізація антропоморфного крокуючого апарата із зображенням його векторів стану



x_b – ступінь свободи лінійного переміщення ланки відносно осі x ;
 \mathbb{R}^6 – простір із 6 вимірів;
 H_b – базова точка моделі;
 $SE(3)$ – простий лінійного переміщення;

q – індекс зчленування;
 Q – вектор стану кутів кінематичної схеми АКА;
 \mathbb{R}^n – простір із n вимірів;
 T^n – вектор стану АКА, поданий операторною формою;
 S^1 – матриця кутового перетворення.

Демонстраційний плакат №3
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.
Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

Загальна схема п'ятиланкової плоскої моделі АКА

Схема розташування ланок та міжланкових кутів

x, y – базова система координат;

m_0, m_1, m_2 – маси ланок АКА;

r_0, r_1, r_2 – відстані від шарнірів до ТЦМ ланок;

l_0, l_1, l_2 – довжини ланок апарата;

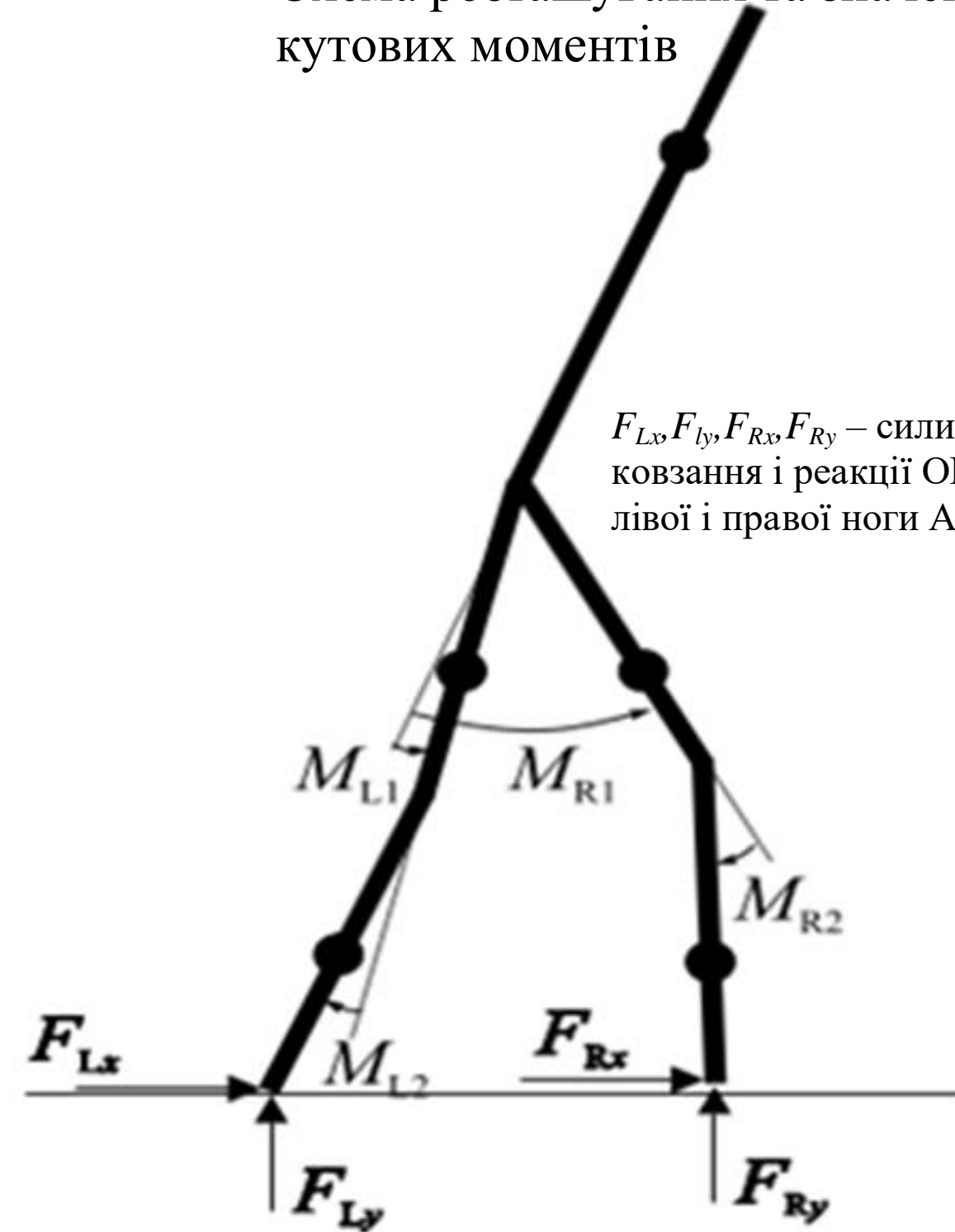
x_0, y_0 – положення ТЦМ АКА;

α, β, γ – кути кінематичних пар ланок апарата;



Схема розташування та значення кутових моментів

$F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Rx}, F_{Ry}$ – сили ковзання і реакції ОП для лівої і правої ноги АКА.



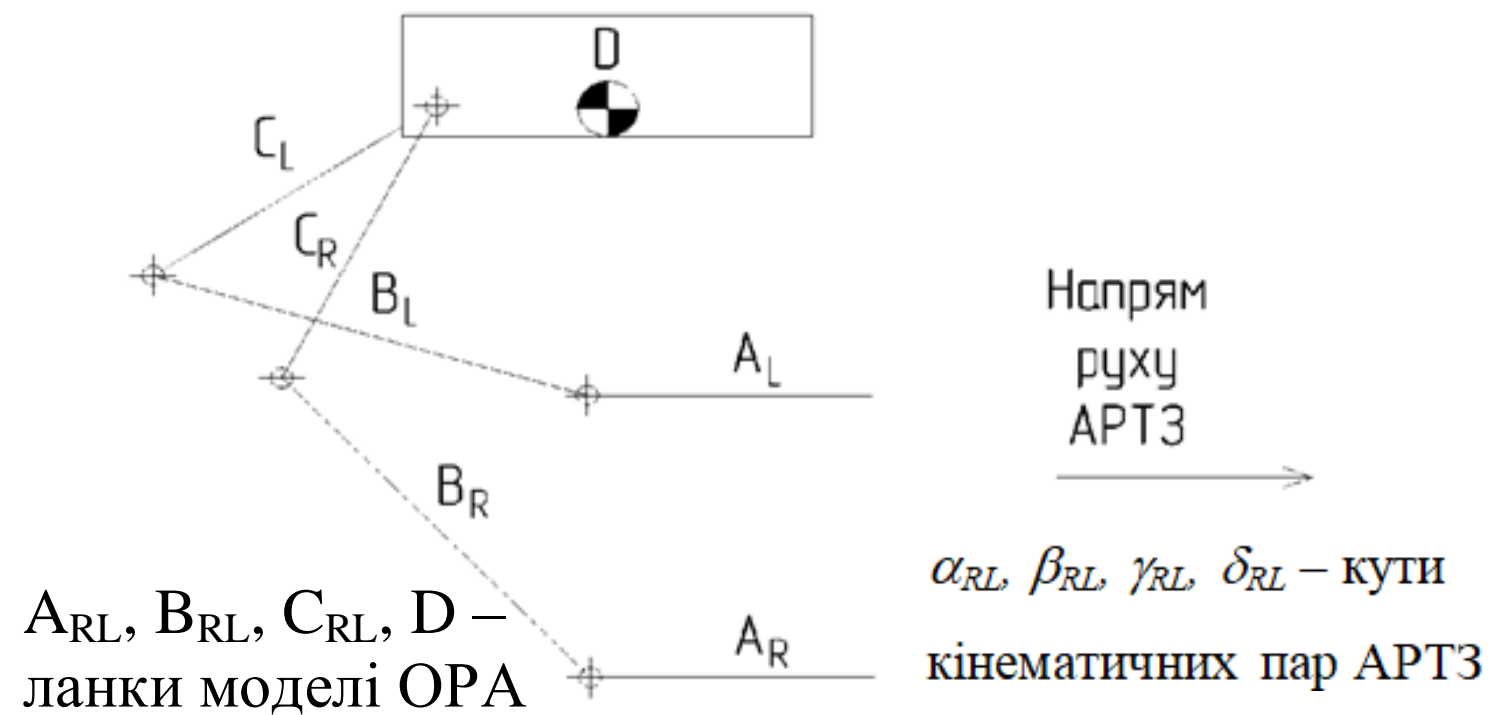
Демонстраційний плакат №4
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.

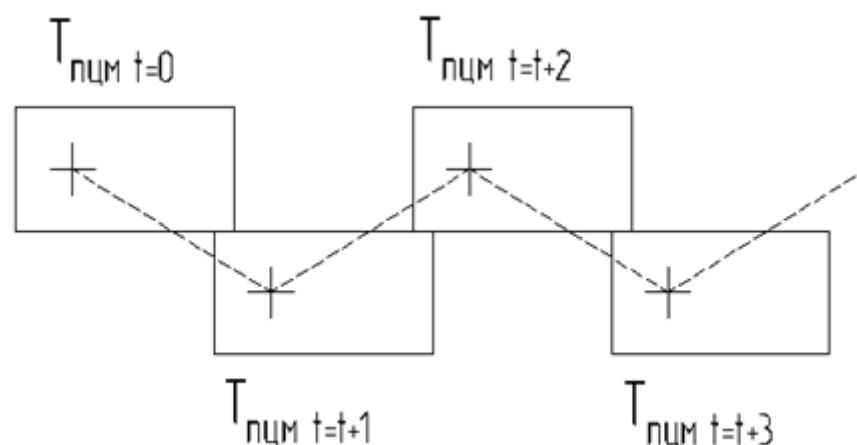
Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

Кінематична модель для пересування по довільній поверхні

Узагальнена структура моделі ОРА для АРТЗ



Неперервний слід ланок стоп АРТЗ на опорній поверхні



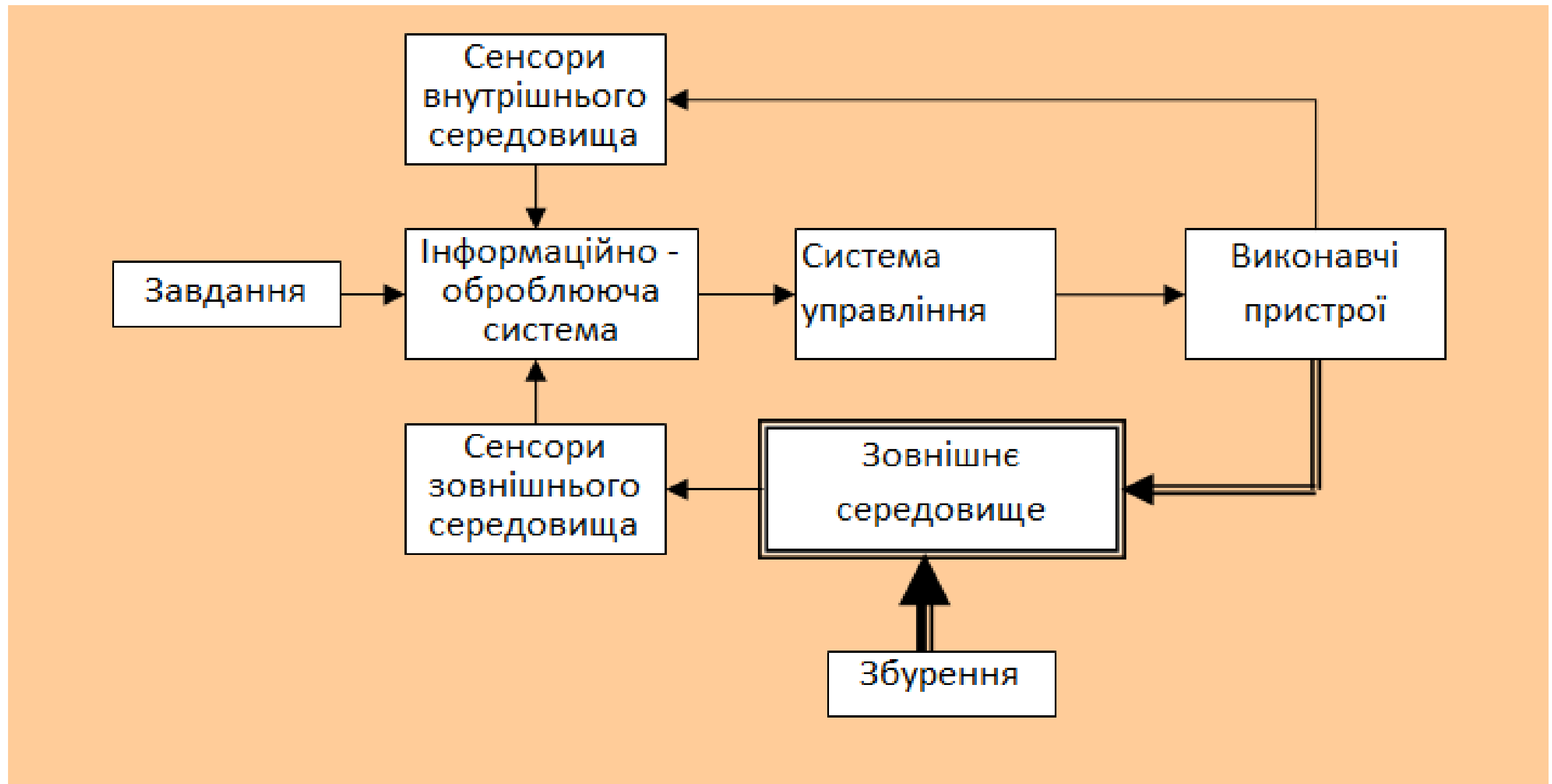
Кінематична схема АРТЗ у аналітичній формі



Демонстраційний плакат №5
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.
Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

Загальна модель взаємодії виконавчих органів АРТЗ з його сенсорикою через взаємовплив навколишнього середовища



Демонстраційний плакат №6
до магістерської дисертації на тему
«Аналіз методів кінематики та динаміки антропоморфних роботизованих
транспортних засобів»

Розробив: студент гр. ІК-81мп Дворський В.О.
Прийняв: к.т.н., доцент Ткач М. М.

ДОДАТОК Б
ПЕРЕВІРКА НА СПІВПАДІННЯ